



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRI TERVO
KONTTILUKIN RASVAVOITELUJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja:
professori Kalevi Huhtala

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
4. tammikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HENRI TERVO: Konttilukin rasvavoitelujärjestelmän kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 69 sivua, 7 liitesivua

Kesäkuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Kalevi Huhtala

Avainsanat: rasvavoitelu, keskusvoitelujärjestelmä, konttilukki

Voitelun avulla pienennetään liikkuvien koneenosien tai muiden kappaleiden kulumista ja niiden välistä kitkaa. Erilaisia voitelulaitteita tai -järjestelmiä käyttämällä voiteluaine saatetaan voitelukohteille. Asiakaspalautteiden ja yrityksen omien testien perusteella kohdeyritys Kalmar huomasi kehitystarpeen konttilukkien automaattisessa rasvavoitelujärjestelmässä. Osassa koneista keskusvoitelun piirissä olevat voitelukohteet olivat saaneet liikaa rasvaa, jolloin koneet likaantuivat nopeasti, mutta ennen kaikkea ylimääräinen rasva voi tippua maahan ja satamaolosuhteissa päätyä jopa mereen asti. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, voidaanko konttilukin rasvavoitelujärjestelmää kehittää käyttämällä apuna kirjallisuudesta löydettyjä rasvavoiteluteorioita sekä tutkimalla uusia vaihtoehtoisia järjestelmiä.

Työssä perehdyttiin voitelun perusteisiin, voiteluaineisiin sekä keskusvoitelujärjestelmiin suorittamalla kirjallisuuskatsaus vaadittavassa laajuudessa. Nykyistä keskusvoitelujärjestelmää käytiin läpi voitelukohteittain, jotta päästiin selville kohteiden tyypeistä ja lukumääristä sekä niille syötetyistä rasvamääristä. Kirjallisuusselvityksessä löydettyjä ohjeita ja teorioita hyödyntämällä luotiin ehdotus, kuinka konttilukin nykyistä voitelujärjestelmää voitaisiin kehittää. Vaihtoehtoiseksi järjestelmäksi valikoitui kaksilinjainen voitelujärjestelmä ja sille tehtiin periaatemitoitus konttilukille. Mitoitettaessa vaihtoehtoista järjestelmää huomattiin sen soveltuvan nykyisen voitelujärjestelmän korvaajaksi.

Kaikkia kolmea järjestelmää vertailtiin keskenään, jotta niiden erot saatiin selvitettyä. Nykyisen järjestelmän kehitetty versio ei fyysisesti juurikaan eroa alkuperäisestä, mutta pienillä muutoksilla voitelukohteille syötetty rasvamäärä saatiin pienennettyä noin puoleen alkuperäisestä säilyttäen voitelu toimivalla tasolla. Vaihtoehtoinen järjestelmä olisi taas alkuperäiseen verrattuna paremmin säädettävissä ja matalamman käyttöpainetason vuoksi luotettavampi. Suuri etu vaihtoehtoisessa järjestelmässä on mahdollisuus käyttää tulevaisuudessa biohajoavia voitelurasvoja.

Asetettuun tutkimuskysymykseen vastattiin onnistuneesti. Konttilukin nykyistä voitelujärjestelmää on mahdollista kehittää kirjallisuudesta löydettyjen ohjeiden ja teorioiden avulla tai korvaamalla nykyinen järjestelmä vaihtoehtoisella voitelujärjestelmällä. Nykyisen voitelujärjestelmän kehittäminen on suhteessa yksinkertainen tapa saada voitelun toimivuutta paremmaksi, mutta pitkällä tähtäimellä vaihtoehtoinen järjestelmä on parempi ratkaisu uudeksi voitelujärjestelmäksi.

ABSTRACT

HENRI TERVO: Developing Central Lubrication System of a Straddle Carrier
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 69 pages, 7 Appendix pages
June 2017
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering
Major: Fluid Power
Examiner: Professor Kalevi Huhtala

Keywords: grease lubrication, central lubrication system, straddle carrier

Lubrication is needed to reduce wearing and friction between moving machine parts. By using different kind of lubrication devices and systems the lubricant is dispensed to lubrication points. Based on the feedback and tests the case company Kalmar noticed that the central lubrication system of a straddle carrier needs developing. Some of the straddle carriers had received too much grease which turned up as dirty machines but there was also a risk that the dropping lubricant might end up to the water system. The aim of this thesis is to find out if the central lubrication system of a straddle carrier can be developed by using different kind of lubrication theories and studying alternative systems.

Basics of lubrication, different lubricants and lubrication systems were studied in this thesis. All the lubrication points of a straddle carrier were examined so the types and quantities of the points became clearer. Also the dispensed grease amounts were examined. Based on the lubrication theories and instructions there was a possibility to create a proposition how the present lubrication system could be improved. The chosen alternative system was a dual-line type system. After that a basic design was made to see how the system would fit to the straddle carrier.

All the three systems were compared with each other to see the biggest differences. Developed version of the present system does not differ considerably but with small modifications grease quantities were reduced almost to half from the original amount. The alternative system would be more suitable because of its better adjustability and lower pressure level.

The conclusion was that the central lubrication system of a straddle carrier can be developed by using different kind of lubrication theories and instructions. Also the alternative dual-line system can replace the present system. Developing the present system is an easy way to improve the lubrication but the alternative system would be more functional in the future.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kalmarin IHTS-tuotelinjalle, jonka päätuote on konttilukki. Työssä käsitellään konttilukin keskusvoitelujärjestelmää, sen kehittämistä sekä vaihtoehtoista rasvavoitelujärjestelmää. Työ tehtiin Tampereen Ruskossa Kalmarin teknologia- ja osaamiskeskuksessa lokakuun 2016 ja toukokuun 2017 välisenä aikana.

Haluan kiittää kaikkia tähän diplomityöprosessiin myötävaikuttaneita. Erityiskiitokset Kalmarin puolesta työtä ohjanneelle Pasi Rantaselle, jonka aidon kiinnostuksen ja välittämisen myötä tämä diplomityö tuli mahdolliseksi. Pasi antamat vinkit ja tietämys koneista olivat työtä tehdessä korvaamaton apu. Tampereen teknillisen yliopiston puolelta haluan kiittää työn tarkastajaa professori Kalevi Huhtalaa ideoista ja ohjeistuksista.

Kuuden vuoden opiskelutaival ei varmasti olisi ollut samanlainen ilman uusia ja vanhoja tuttavuuksia. Heidän kanssa kerätyt kokemukset säilyvät muistoissa varmasti läpi elämän. Olen todella kiitollinen myös perheelleni. Ilman vanhempieni tukea ja heiltä saatua kasvatusta tuskin olisin tähän urakkaan pystynyt. Lopuksi haluan kiittää kihlatuani Elinaa tuesta, ymmärryksestä ja yhteiselosta koko opiskeluaikana.

Tampereella, 8.5.2017

Henri Tervo

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Kohdeyritys	1
1.2	Konttilukki	2
1.3	Aiheen rajausta ja osatehtävät	3
2.	KESKUSVOITELUAINEET JA –JÄRJESTELMÄT	4
2.1	Voitelun perusteet	4
2.2	Voitelumekanismit	5
2.3	Rasvavoitelu	7
2.4	Voiteluainetyypit	9
2.5	Voiteluöljyt	11
2.5.1	Mineraaliöljyt	11
2.5.2	Synteettiset öljyt	11
2.6	Voitelurasvat	12
2.6.1	Perusöljyt	12
2.6.2	Saentimet ja lisäaineet	13
2.6.3	Testausmenetelmät	15
2.7	Keskusvoitelujärjestelmät	17
2.7.1	Yksilinjainen järjestelmä	19
2.7.2	Progressiivinen järjestelmä	19
2.7.3	Kaksilinjainen järjestelmä	20
3.	KONE-ELINTEN RASVAVOITELU	22
3.1	Rasvavoitelutavan vaikutus	23
3.2	Vierintälaakerit	25
3.2.1	Lämpötilan vaikutus voitelun toimivuuteen	25
3.2.2	Jälkivoiteluväli	27
3.2.3	Jälkivoitelumäärä	28
3.3	Liukulaakerit	29
3.4	Liukupinnat	30
3.5	Nivelakselit	31
4.	NYKYINEN VOITELUJÄRJESTELMÄ	32
4.1	Lincoln P215	32
4.1.1	Pumppuelementti	33
4.1.2	Jakajat	34
4.1.3	Pumppaus- ja taukoajan säätö	37
4.2	Konttilukin voitelukohteet	37
4.2.1	Ohjaus	38
4.2.2	Nostopalkki	39
4.2.3	Tarttuja	39
4.3	Nykyisen järjestelmän suorituskyky	40

4.3.1	Syötettyjen rasvamäärien tarkastelu.....	41
4.3.2	Kytcentöjen merkitys voitelun toimintaan.....	43
5.	NYKYISEN JÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN.....	44
5.1	Rasvamäärien uudelleenmääritys.....	44
5.1.1	Nivellaakerit.....	45
5.1.2	Liukulaakerit.....	46
5.1.3	Vierintälaakerit.....	47
5.1.4	Muut voitelukohteet.....	47
5.2	Uudet rasvamäärät.....	47
5.3	Muutoksien toteutus käytännössä.....	48
5.4	Suorituskyvyn arviointi uusilla rasvamäärillä.....	49
6.	VAIHTOEHTOINEN RASVAVOITELUJÄRJESTELMÄ.....	51
6.1	Groeneveld Twin-3.....	51
6.1.1	Voitelujaksot ja -vaiheet.....	52
6.1.2	Pumppuyksikkö.....	53
6.1.3	Suuntaventtiili.....	54
6.1.4	Jakajat ja annostelijat.....	55
6.1.5	Painekytkin.....	57
6.2	Järjestelmän mitoitus konttilukille.....	57
6.3	Komponentit ja voitelukaavio.....	58
6.4	Vaihtoehtoisen järjestelmän suorituskyvyn arviointi.....	60
7.	ERI VAIHTOEHTOJEN VERTAILU JA ANALYSOINTI.....	62
8.	YHTEENVETO.....	65
	LÄHTEET.....	67

LIITE A: PIENENNYSKERTOIMET KAAVALLE 2

LIITE B: KESKUSVOITELUKAAVIO, NYKYINEN JÄRJESTELMÄ

LIITE C: EXCEL-MALLI, NYKYINEN JÄRJESTELMÄ

LIITE D: KESKUSVOITELUKAAVIO, KEHITETTY JÄRJESTELMÄ

LIITE E: EXCEL-MALLI, KEHITETTY JÄRJESTELMÄ

LIITE F: VAIHTOEHTOISEN JÄRJESTELMÄN LASKETUT RASVAMÄÄRÄT

LIITE G: VAIHTOEHTOISEN JÄRJESTELMÄN VOITELUKAAVIO

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Konttilukin pääosat sivulta kuvattuna. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.20).....</i>	<i>2</i>
Kuva 2.	<i>Diplomityön osatehtävät kuvattuna.....</i>	<i>3</i>
Kuva 3.	<i>Voitelukalvon paksuus sekä kitkakerroin Stribeckin parametrin funktiona (Mang & Dresel 2007, s. 14).</i>	<i>6</i>
Kuva 4.	<i>Voitelukalvon paksuuden muutos laakerissa ajan suhteen. Alkutilanteessa laakeri on täytetty voitelurasvalla. Perustuu lähteeseen (Promaint 2013, s.45).....</i>	<i>9</i>
Kuva 5.	<i>Voiteluaineiden ryhmittely. Perustuu lähteeseen (Kivioja et. al. 2007, s.171).....</i>	<i>10</i>
Kuva 6.	<i>Voiteluainetyyppien soveltuvuus eri kuormitusalueille ja liukunopeuksille. (Kivioja et. al. 2007, s.170).....</i>	<i>10</i>
Kuva 7.	<i>Rasvan perusrakenne. (Miettinen 2001)</i>	<i>13</i>
Kuva 8.	<i>Tunkeumakokeessa (DIN 51804) käytettävä penerometri. (Promaint 2010, s.10).....</i>	<i>16</i>
Kuva 9.	<i>Keskusvoitelujärjestelmän putkistojen nimitykset. (Promaint 2013, s.228).....</i>	<i>18</i>
Kuva 10.	<i>Yksilinjaisen keskusvoitelujärjestelmän annosteluventtiilin periaatekuva. (FAG 1998).....</i>	<i>19</i>
Kuva 11.	<i>Progressiivinen keskusvoitelujärjestelmä. Perustuu lähteeseen (YTM 2016b).....</i>	<i>20</i>
Kuva 12.	<i>Kaksilinjaisen voitelujärjestelmän komponentit. (perustuu lähteeseen SKF 2015a)</i>	<i>21</i>
Kuva 13.	<i>Ennen aikaisten vierintälaakerivaurioiden syyt teollisuudessa. Perustuu lähteeseen (Katz 2012).....</i>	<i>23</i>
Kuva 14.	<i>Rasvavoitelutavan vaikutus voitelun toimivuuteen. Perustuu lähteeseen (Jauhiainen 2008, s.42).....</i>	<i>24</i>
Kuva 15.	<i>Vierintälaakerien eri rakennemuodot: 1. urakuulalaakeri, 2. pallomainen kuulalaakeri, 3. viistokuulalaakeri, 4. lieriörullalaakeri, 5. neulalaakeri, 6. pallomainen rullalaakeri, 7. kartiorullalaakeri, 8. painekuulalaakeri, 9. painelieriörullalaakeri ja 10. pallomainen painerullalaakeri. Perustuu lähteeseen (Kivioja et. al. 2007, s.236).....</i>	<i>25</i>
Kuva 16.	<i>Voitelurasvan käyttölämpötila-alueiden rajat. (Promaint 2013, s. 208)</i>	<i>26</i>
Kuva 17.	<i>Jälkivoiteluvälin määrittäminen edullisissa ympäristöolosuhteissa. Perustuu lähteeseen (FAG 1998, s.36).</i>	<i>27</i>
Kuva 18.	<i>Kokemusperäisesti saadut suurimmat sallitut liukunopeudet rasvavoidellulle liukulaakerille. (Kara 1989, s.119)</i>	<i>29</i>
Kuva 19.	<i>Voitelu-urien sijoittelu akselin pyöriessä yhteen suuntaan (a), akselin pyöriessä molempiin suuntiin (b). (Promaint 2010, s.32).....</i>	<i>30</i>

Kuva 20.	<i>Lincoln P215 -keskusvoitelupumppu. (Lincoln 1996, s.1)</i>	32
Kuva 21.	<i>P215-pumpun eri käyttösovellukset keskusvoitelujärjestelmässä. (Lincoln 1996, s.6)</i>	33
Kuva 22.	<i>Pumppuelementin läpileikkaus. Perustuu lähteeseen (Lincoln 1996, s.10)</i>	34
Kuva 23.	<i>Jakajan toiminta, vaihe 1. Perustuu lähteeseen (Lincoln 2006, s.23)</i>	35
Kuva 24.	<i>Jakajan toiminta, vaihe 2. (Lincoln 2006, s.23)</i>	35
Kuva 25.	<i>Jakajan toiminta, vaihe 3. (Lincoln 2006, s.24)</i>	36
Kuva 26.	<i>Jakajan toiminta, vaihe 4. (Lincoln 2006, s.24)</i>	36
Kuva 27.	<i>Jakajan toiminta, vaihe 5. (Lincoln 2006, s.24)</i>	36
Kuva 28.	<i>Ohjausvarren laakereiden voitelupisteet. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.157)</i>	38
Kuva 29.	<i>Ohjauslaitteiden laakereiden voitelupisteet. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.152)</i>	38
Kuva 30.	<i>Nostopalkin voitelupisteiden sijainnit. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.207)</i>	39
Kuva 31.	<i>Tarttujan voitelupisteiden sijainnit. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.236)</i>	40
Kuva 32.	<i>Ongelmakohtia nykyisessä järjestelmässä.</i>	42
Kuva 33.	<i>SKF LAGM 1000E -rasvamittari. (SKF 2017)</i>	45
Kuva 34.	<i>Groeneveld Twin-3 -järjestelmän pääkomponentit. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.7)</i>	51
Kuva 35.	<i>Voitelujaksot ja niiden sisältämät vaiheet. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.8)</i>	52
Kuva 36.	<i>Pumppuyksikön komponentit. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.10)</i>	54
Kuva 37.	<i>Suuntaventtiilin piirrosmerkki. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.14)</i>	55
Kuva 38.	<i>Jakaja, annostelijat ja paineakytkin. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.16)</i>	55
Kuva 39.	<i>Annostelijan toimintaperiaate. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.17–18)</i>	56
Kuva 40.	<i>Groeneveld Twin-3 XL -pumppuyksikkö. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2017)</i>	59

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Rasvavoitelun edut ja haitat öljyvoiteluun verrattuna. (Promaint 2013, s.43; Mang & Dresel 2007, s. 648; Jauhiainen 2008)</i>	7
Taulukko 2.	<i>Rasvojen saennintyytit ja niiden ominaisuudet. (Promaint 2010, s.6–7)</i>	14
Taulukko 3.	<i>Rasvojen NLGI-luokat. (Promaint 2013, s.81)</i>	16
Taulukko 4.	<i>Jälkivoitelumäärän laskemiseen tarvittavan V-termin arvot eri voiteluväleille. (Promaint 2010, s.30)</i>	28
Taulukko 5.	<i>Pumppuelementin tuotto iskua kohden eri R:n arvoilla. (Lincoln 1996, s.10)</i>	34
Taulukko 6.	<i>Pumppuelementtien tuotot eri ajanjaksoilla tarkasteltuna.</i>	41
Taulukko 7.	<i>Voitelukohteille syötetyt rasvamäärät 24 tunnissa</i>	41
Taulukko 8.	<i>Raidetangon nivellaakerin rasvatestin tulokset.</i>	45
Taulukko 9.	<i>Lasketut rasvatilavuudet liukulaakereille.</i>	46
Taulukko 10.	<i>Vierintälaakereiden tiedot rasvamäärän arviointiin.</i>	47
Taulukko 11.	<i>Uudet rasvamäärät nykyiselle voitelujärjestelmälle</i>	48
Taulukko 12.	<i>Kehitetyn järjestelmän syöttämät rasvamäärät viikkotasolla</i>	50
Taulukko 13.	<i>Eri annostelijavaihtoehdot. (Groeneveld 2013, s.16)</i>	56
Taulukko 14.	<i>Vaihtoehtoisen järjestelmän syöttämät rasvamäärät vuorokaudessa</i>	58
Taulukko 15.	<i>Vaihtoehtoisen järjestelmän osaluettelo</i>	59
Taulukko 16.	<i>Annostelijoiden syöttämät rasvamäärät voitelujaksoa kohden.</i>	61
Taulukko 17.	<i>Nykyisen ja vaihtoehtoisen voitelujärjestelmän vertailu.</i>	64

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AW	Kulumisen esto, (Anti Wear)
ESC	Electric Straddle Carrier, sähkökäyttöinen konttilukki
EP	Paineenkesto-, (Extreme Pressure)
ISO	International Organization for Standardization
NLGI	National Lubrication Grease Institute
PAO	Polyalfaolefiini
PLC	Ohjelmoitava logiikka, (Programmable Logic Controller)
RMS-arvo	Neliöllinen keskiarvo, (root mean square)
VMF	Paineensäilytysvaiheen kerroin (venting multiply factor)
B	Laakerin leveys [mm]
D	Laakerin halkaisija [mm]
f_n	Pienennyskerroin
G	Rasvan määrä [g]
h_{min}	Voitelukalvon minimipaksuus
λ	Voitelukalvon ominaispaksuus
n	Iskujen määrä [1/min]
Q	Pumppuyksikön tuottama rasvamäärä [cm ³]
R_a	Aritmeettinen keskipoikkeama
σ_1 ja σ_2	Kosketuspintojen pinnankarheuksien RMS-arvot
t_f	Voiteluväli
t_{fq}	Epäedulliset olosuhteet huomioonottava voiteluväli
V	Laakerin voitelutiheys
V_p	Pumppuyksikön iskutilavuus [cm ³]

1. JOHDANTO

Asiakaspalautteiden ja yrityksen omien testien perusteella tämän diplomityön kohdeyritys Kalmar havaitsi kehitystarpeen konttilukkien automaattisessa rasvavoitelujärjestelmässä. Osassa koneista keskusvoitelun piirissä olevat voitelukohteet ovat saaneet liikaa rasvaa. Tästä johtuen koneet likaantuvat nopeasti, mutta ennen kaikkea ylimääräinen rasva voi tippua maahan ja satamaolosuhteissa päätyä jopa mereen asti. Tällöin ongelma ei ole pelkästään imagohaitta likaisten koneiden muodossa, vaan riskinä voi olla suurempi ympäristöongelma.

Kalmarin suunnittelemaa lastinkäsittelyratkaisuja on monissa satamissa ja terminaaleissa ympäri maailmaa. Yrityksen yhtenä keskeisenä tavoitteena on tarjota asiakkailleen korkealaatuisia ja innovatiivisia tuotteita. (Kalmar 2017) Myös kestävä kehitys ja ympäristöstä huolehtiminen kuuluvat Kalmarin arvoihin ja yritys on sitoutunut noudattamaan ympäristöjohtamisessaan standardia ISO 14001 (Kalmar 2016a).

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, voidaanko konttilukin rasvavoitelujärjestelmää kehittää käyttämällä apuna kirjallisuudesta löydettyjä rasvavoiteluteorioita sekä tutkimalla uusia vaihtoehtoisia järjestelmiä. Tavoitteena on saada syötetyt rasvamäärät sopiviksi, ettei ylivoitelua tapahtuisi.

1.1 Kohdeyritys

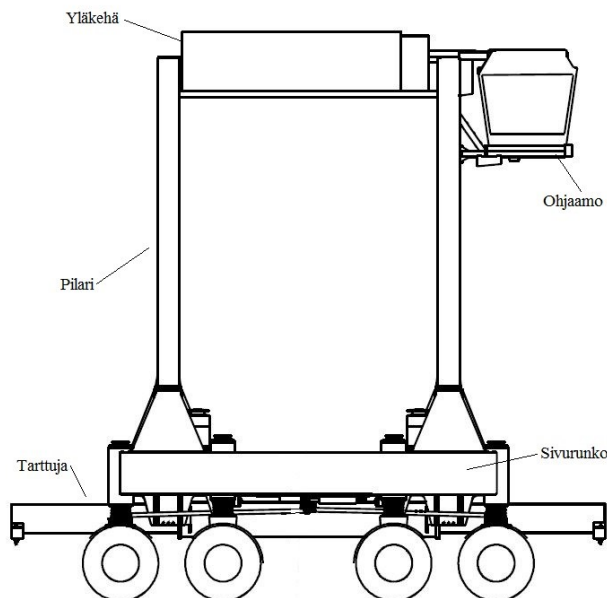
Cargotec-konserniin kuuluva Kalmar tarjoaa asiakkailleen lastinkäsittelyratkaisuja sekä -palveluja satamiin ja terminaaleihin. Yrityksen erityisosaamiseksi voidaan lukea terminaalien automatisointi ja energiatehokkaiden lastinkäsittelyratkaisujen tarjoaminen. Globaalisti mitattuna joka neljäs kontti siirtyy Kalmar-lähtöisen ratkaisun avulla. Kalmarin tuoteportfolioon kuuluvat automaattiset konttinosturit, haarukkatrukit, kontti- ja kuljetuslukit, konttikurottajat, mastolliset lastinkäsittelijät, mobiilipukkinosturit, satamanosturit sekä terminaalitraktorit. (Kalmar 2017)

Kalmarilla oli vuoden 2016 lopussa yli 5700 työntekijää 30 eri maassa, joista suurimpia ovat Yhdysvallat, Malesia, Ruotsi, Kiina, Suomi, Puola, Espanja, Intia ja Alankomaat. Kuormankäsittelylaitteiden lisäksi yritys tarjoaa myös automaatio- ja ohjelmistoratkaisuja sekä service-liiketoimintaa. Vuonna 2016 Kalmarin liikevaihto oli 1,7 miljardia euroa. (Kalmar 2017)

1.2 Konttilukki

Konttilukkien tehtävänä on, tyypistä riippuen, joko kuljettaa kontteja STS-nosturilta konttinosturille tai kuljettamisen lisäksi pinota kontteja satamaterminaalissa. Lukki nostaa ja kuljettaa kontit pystypilareidensa välissä ja suurimmat lukit pinoavat jopa neljä standardikokoista konttia päällekkäin (Pöllänen et. al. 2005, s.100). Kalmarin lukkivalikoimaan kuuluu useampia erilaisia vaihtoehtoja, mutta tässä työssä keskitytään sähköiseen pinoavaan konttilukkiin, eli ESC-sarjan lukkiin, ja tarkemmin rajattuna ESC350-malliin.

Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, konttilukki koostuu viidestä pääosasta: yläkehästä, neljästä pilarista, ohjaamosta, kahdesta sivurungosta sekä tarttujasta. ESC-sarjan lukissa yläkehällä sijaitsevat starttiakut, dieselmoottori, hydraulikka ja nostolaitteet. Sähkömoottorit, joiden avulla kone saatetaan liikkeelle, on kiinnitetty pilareiden alapäähän. Ohjauslaitteet on sijoitettu sivurunkojen alapuolelle.



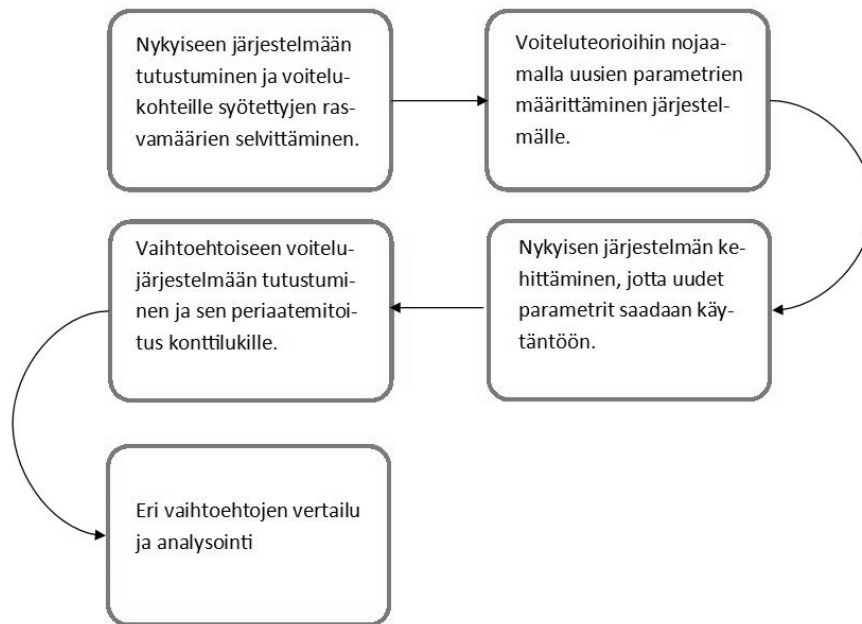
Kuva 1. Konttilukin pääosat sivulta kuvattuna. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.20)

ESC350-konttilukin voimanlähteenä on 11 litrainen 6-sylinterinen turboahdettu dieselmoottori, joka pyörittää generaattoria. Generaattorilla tuotetaan jännitettä välipiirille, kun sähkömoottorit tarvitsevat virtaa. Koneen omapaino on 69 tonnia ja nostokapasiteetti tarttujasta riippuen joko 40 tai 50 tonnia. Lukin huippunopeus on vain 30 km/h, mutta isolle koneelle se on vilkkaasti liikennöidyssä satamassa ehdottomasti riittävä. (Kalmar 2016b, s.506–507)

1.3 Aiheen rajausta ja osatehtävät

Tämän diplomityön aihe on rajattu koskemaan ESC350-konttilukin osalta automaattista rasvavoitelujärjestelmää mukaan lukien muut komponentit, joita järjestelmän avulla voidellaan. Työssä ei oteta kantaa manuaalisesti voideltavien kohteiden voiteluun.

Työn tavoitteena on saada syötetyt rasvamäärät lähemmäksi voiteluteorioista löytyviä arvoja. Tätä varten tehdään kirjallisuusselvitys voiteluteorioista ja voiteluaineista. Varsinaisia osatehtäviä tässä diplomityössä on kirjallisuusselvitystä lukuun ottamatta viisi. Kuvassa 2 esitellään työn osatehtävät.



Kuva 2. Diplomityön osatehtävät kuvattuna.

Ensimmäisenä osatehtävänä on tarkastella konttilukin rasvavoitelujärjestelmän syöttämiä rasvamääriä voitelukohteille ja vertailla arvoja kirjallisuudesta löydettyihin rasvavoiteluteorioihin. Rasvamäärien ollessa tiedossa voidaan tutkia, onko nykyistä järjestelmää mahdollista kehittää siten, että voitelukohteille syötetyt rasvamäärät saadaan lähemmäksi teoreettisia arvoja.

Kun uudet parametrit nykyiselle voitelujärjestelmälle on saatu laskettua, mietitään, kuinka järjestelmää saadaan muutettua käytännössä. Neljäntenä osatehtävänä mitoitetaan konttilukille markkinoilla oleva vaihtoehtoinen rasvavoitelujärjestelmä ja analysoidaan ja verrataan valittua vaihtoehtoa nykyiseen järjestelmään. Lopuksi vertaillaan eri vaihtoehtoja keskenään ja yhteenvedossa kootaan työn tulokset ja esitetään keskeisimmät havainnot vastaten samalla tutkimuskysymykseen.

2. KESKUSVOITELUAINEET JA -JÄRJESTELMÄT

Voitelun avulla pienennetään liikkuvien koneenosien tai muiden kappaleiden kulumista ja niiden välistä kitkaa. Voiteluaineen tehtävänä on estää osittain tai kokonaan osien väliset kosketukset joko itse tai muodostaa suojaava kalvo kosketuspinnalle (Kivioja et. al. 2007 s.129). Erilaisia voitelulaitteita tai -järjestelmiä käyttämällä voiteluaine saataan voitelukohteille. Tässä työssä keskitytään keskusvoitelujärjestelmiin ja tarkemmin rasvakeskusvoiteluun.

Keskusvoitelujärjestelmiä on olemassa useaa eri tyyppiä ja ne voidaan jakaa kiertovoitelu-, öljyvoitelu- ja rasvavoitelujärjestelmiin. Järjestelmät koostuvat yhdestä tai useammasta voitelukanavasta, jotka taas muodostuvat yhdestä tai kahdesta voitelulinjasta järjestelmätyypistä riippuen. (PSK 5501 2007)

Tehokkaalla voitelulla saadaan aikaan taloudellista hyötyä, kun kitkaa pienentämällä säästetään energiaa ja parannetaan koneen suoritustehokkuutta. Vähäisen kulumisen ansiosta koneet myös kestävät käytössä pidempään. (Promaint 2013 s.11)

2.1 Voitelun perusteet

Voitelun tarkoituksena on liikkuvien koneenosien tai muiden kappaleiden kulumisen ja niiden välisen kitkan pienentäminen (Kivioja et. al. 2007 s.129). Tehokkain tapa pienentää kitkaa toistensa suhteen liikkuvien osien välillä on erottaa ne voiteluainekalvolla. Tällöin voidaan puhua nestevoitelutilanteesta. (Promaint 2013 s.11)

Voiteluaineena voidaan käyttää melkein mitä tahansa helposti leikkautuvaa materiaalia kiinteässä, kaasumaisessa tai nestemäisessä olomuodossa (Kivioja et. al. 2007 s.129). Tässä työssä keskitytään voitelurasvoihin. Voitelun tärkeimmät tehtävät ovat:

- erottaa kosketuspinnat toisistaan
- pienentää kitkaa
- vähentää pintojen kulumista
- jäähdyttää
- kuljettaa epäpuhtaudet ja kulumishiukkaset pois
- vaimentaa värähtelyitä
- suojata voitelukohteita korroosiolta. (Promaint 2013 s.11)

2.2 Voitelumekanismit

Voitelu voidaan käyttö- ja suunnitteluarvoista riippuen erotella kolmeen eri voitelualueeseen, jotka ovat rajavoitelu, sekavoitelu ja puhdas nestevoitelu (Promaint 2013, s.19; Hynönen 2005, s.28). Voitelualueet erotellaan toisistaan voitelukalvon ominaispaksuudella λ , joka voidaan laskea kaavasta

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}, \quad (1)$$

jossa h_{min} on voiteluainekalvon minimipaksuus ja σ_1 ja σ_2 kosketuspintojen pinnankarheuksien RMS-arvot, joilla tarkoitetaan pinnanprofiilin neliöllistä keskipoikkeamaa (Kivioja et. al. 2007 s.129). Kuitenkin pinnoista on yleensä saatavilla pelkästään aritmeettinen keskipoikkeama R_a , jolloin $\sigma \approx 1,3 \times R_a$. Kalvon ominaispaksuus on suuntaa antava parametri, eikä se määrittele yksiselitteisesti voitelun toimivuutta ainakaan pienillä arvoilla ($\lambda < 1$). Ominaiskalvonpaksuudet eri voitelualueilla ovat (Hynönen 2005, s.29):

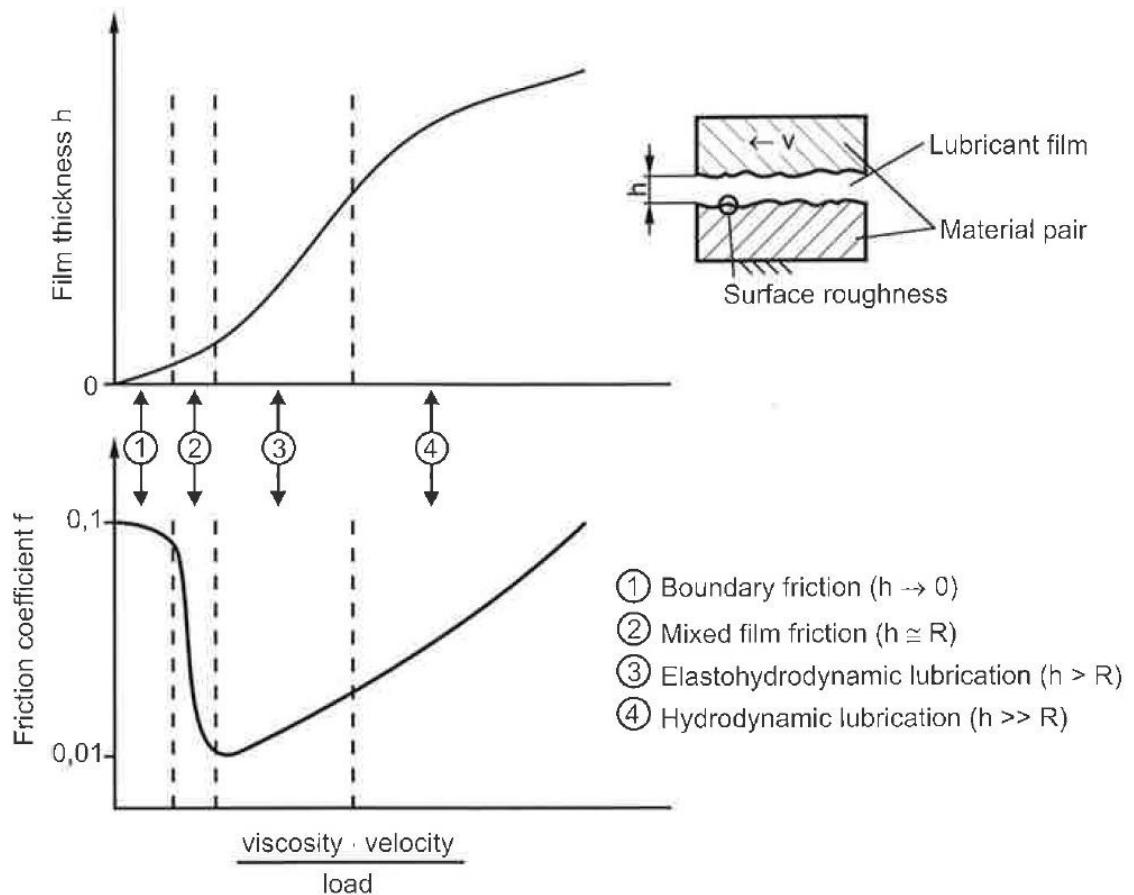
- rajavoitelussa $\lambda < 1$
- sekavoitelussa $1 < \lambda \leq 4$
- nestevoitelussa $\lambda > 4$.

Hidas pintojen välinen liikenopeus, voiteluaineen liian alhainen viskositeetti käyttölämpötilassa, epäedulliset lämmönsiirto-ominaisuudet tai riittämätön määrä voiteluainetta aiheuttavat rajavoitelutilanteen. Rajavoitelutilanteessa laakeripinnat ovat lähellä toisiaan, jolloin pinnan karheuden ulokkeet kantavat suurimman osan kuormasta. Tällöin vastinpintoja erottavaa voitelukalvoa ei vielä tai enää ole. Liukupinnoille syntyy kuitenkin huomattavan ohut voitelukerros, joka estää pintojen kosketuksen. Suojaavat ja liukastavat kalvot muodostuvat voiteluaineen lisäaineiden reagoidessa kosketuspinnan kanssa. Hallitussa rajavoitelutilanteessa kitkakerroin on suuruudeltaan noin 0,1 ja kalvonpaksuus 1-10 nm. (Promaint 2013, s.19; Kivioja et. al. 2007 s.167)

Nestevoitelutilanteessa voitelukalvo erottaa kosketuspinnat toisistaan kokonaan, jolloin pintojen välinen kitka on alhainen ja materiaalin ennenaikaista väsymistä tai kulumista ei ilmene. Nestevoitelu voidaan jakaa hydrodynaamiseen, elastohydrodynaamiseen ja hydrostaattiseen voiteluun. (Promaint 2013, s.20)

Sekavoitelutilanne on raja- ja nestevoitelun yhdistelmä. Tällöin osan kuormituksesta kantaa pienikitkainen voiteluainekalvo ja pinnan karheuden ulokkeet kantavat loput kuormituksesta. Jos voitelukalvon paksuus kasvaa, pinnankarheushuippujen kantama kuormitus pienenee ja kosketuksen kokonaiskitkakerroin alenee. Sekavoitelualueella kitkakertoimen vaihtelu riippuu olosuhteiden muuttumisesta, jolloin kosketuspintojen lämpötilavaihtelut voivat olla merkittäviä. Lämpötilan kasvaessa tilanne voi muuttua rajavoitelutilanteeksi. Raja- ja sekavoitelutilanteissa esiintyvät metallikosketukset aihe-

uttavat hitsaamia pintakerrokseen paikallisesti, mikä lisää lämpöä, kitkaa, kulumista ja pintojen väsymistä. (Promaint 2013, s.20). Stribeckin käyrän avulla voidaan kuvata voitelumekanismien ja kitkakertoimen välistä yhteyttä, joka nähdään kuvasta 3.



Kuva 3. Voitelukalvon paksuus sekä kitkakerroin Stribeckin parametrin funktiona (Mang & Dresel 2007, s. 14).

Kuvan 3 ylemmästä kuvaajasta nähdään voitelukalvon paksuuden riippuvuus Stribeckin parametrin funktiona. Alempi kuvaaja osoittaa, kuinka kitkakerroin muuttuu Stribeckin parametrin kasvaessa. Kuvaajasta nähdään myös sekavoitelun alueella käyrän jyrkkyys, joka todistaa kitkakertoimen suuren vaihtelun, jos olosuhteissa tapahtuu pienikin muutos.

Pienillä nopeuksilla pyörivät liuku- ja vierintälaakerit, hammaspyörät, hammaskytkimet ja murrosnivelet toimivat raja- ja sekavoitelualueella. Yleensä nämä sovellutukset ovat rasvavoideltuja, mikä asettaa korkeat vaatimukset voitelurasvojen ja -öljyjen lisäaineistukselle sekä niiden toimivuudelle. Seka- ja rajavoitelua voi esiintyä myös nestevoitelussa erityisesti käynnistyksen ja pysäytyksen yhteydessä. (Promaint 2013, s.34)

Täydellistä hydrodynaamista voitelukalvoa ei synny raja- ja sekavoitelussa, jolloin vastinpintojen pinnankarheushuiput koskettavat toisiaan. Hallitussa voitelussa nopeasti muodostuvat ja suojaavat pintakalvot saadaan aikaan lisäaineistusta käyttämällä. Itse materiaaliparin tribologisiin ominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan käyttämällä pinta-

käsittelyä, pinnoitteita ja kiinteitä voiteluaineita sekä varmistamalla voiteluaineen tehokas tuonti voitelukohteelle. (Promaint 2013, s.34)

2.3 Rasvavoitelu

Vierintälaakereiden yleisin voitelutapa on rasvavoitelu. Lisäksi sitä käytetään hitaasti pyörivissä liukulaakereissa ja hammaskosketuksissa sekä edestakaista liikettä tekevissä akselitapeissa. Voitelu on mahdollista toteuttaa kertavoiteluna manuaalisesti, käyttämällä kestopvoideltuja laakereita tai automaattisesti keskusvoitelujärjestelmän avulla. (Promaint 2013, s.43)

Öljyvoitelussa toimitaan nestevoitelun alueella, jolloin vastinpintojen välissä vaikuttaa hydrodynaaminen tai elastohydrodynaaminen voiteluainekalvo. Rasvassa taas öljy on sitoutuneena saentimeen, joten samanlaista öljyvirtausta voitelukohteessa ei synny. Täydelliseen nestevoitelutilanteeseen ei rasvavoitelussa tällöin ole edellytyksiä, vaan siinä toimitaan sekavoitelun alueella. (Promaint 2013, s.43)

Rasvavoitelussa voiteluaine ei kuljeta lämpöä pois laakerista toisin kuin öljyvoitelussa. Lämpö poistuu joko ilmaan säteilemällä tai akselia pitkin muihin rakenteisiin johtumalla. Rasvan huonon lämmönsiirtokyvyn takia rasvavoitelun toteutus suurilla pyörimisnopeuksilla ja korkeissa lämpötiloissa vaatii erikoisjärjestelyitä. Rasvan rakenne muuttuu korkeassa lämpötilassa niin paljon, ettei rasva enää pysy laakerissa. (Promaint 2013, s.43). Taulukkoon 1 on kerätty rasvavoitelun etuja ja haittoja öljyvoiteluun verrattuna.

Taulukko 1. Rasvavoitelun edut ja haitat öljyvoiteluun verrattuna. (Promaint 2013, s.43; Mang & Dresel 2007, s. 648; Jauhiainen 2008)

Edut	Haitat
Yksinkertainen, halvempi rakenne	Huono lämmönsiirto pois voitelukohteesta
Yksinkertainen tiivistäminen vettä, epäpuhtauksia ja poistovalumista vastaan	Suurin sallittu pyörimisnopeus alhaisempi
Kitka ja käyntilämpötila yleensä alhaisempi	Kapeampi käyttölämpötila-alue
Soveltuu myös kaltevien tai pystyssä olevien akselien laakereiden voiteluun	Kulumapartikkelit eivät pääse poistumaan laakerista
Useat käynnistykset ja pysäytykset eivät ole ongelma	Rasvan hapettuminen

Rasvavoitelun toiminnan kannalta voidaan laakerissa erottaa kolme hallitsevaa mekanismia: perusöljyn erottuminen saentimesta, rasvan kulkeutuminen vierintäelimen avulla kosketuskohtaan pidikkeen kautta sekä tärinän aiheuttama rasvan liike laakerissa (Promaint 2013, s.43). Jauhiaisen (2008) mukaan ongelma rasvavoitelussa on perusöl-

jyn riittämätön tai liiallinen erottuminen saentimesta. Liiallinen erottuminen aiheuttaa rasvan nopean vanhenemisen ja sitä kautta lyhyen käyttöiän. Toisaalta riittämätön perusöljyn erottuminen johtaa riittämättömään voiteluöljyn saantiin laakerin kriittisillä pinnoilla.

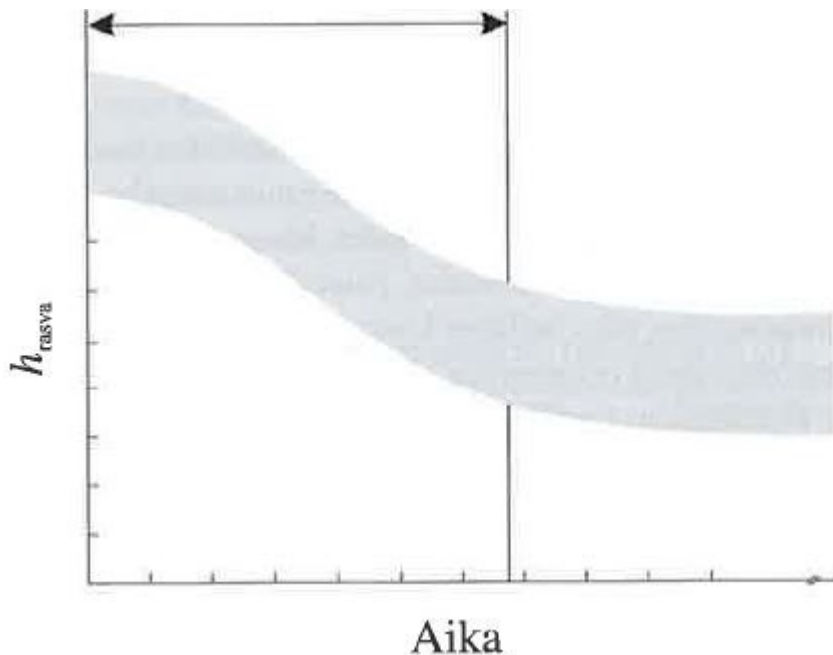
Voideltaessa laakeria se täytetään rasvalla. Ensimmäisessä käynnistyksessä täytön jälkeen vierintäelimet työntävät rasvaa laakerin ympärillä olevaan tyhjiin tilaan. Tästä syystä alkuvaiheessa laakerin kitka ja lämpötila kohoavat. Täyttöasteeksi laakeripesälle suositellaan 30–50 % pesän kokonaistilavuudesta. Tällä varmistetaan, että rasvan siirtymiselle ja lämpölaajenemiselle jää riittävästi tilaa eikä laakerin ylikuumenemisesta ole vaaraa. Alkukäynnistyksen lämmön nousun vuoksi rasvavoideltujen vierintälaakereiden suurimmat sallitut pyörimisnopeudet ovat öljyvoideltuja laakereita alhaisemmat. (Promaint 2013, s.44)

Kun suurin osa rasvasta on ajautunut laakerin ympärillä olevaan tilaan, vaikuttavat voitelumekanismit ovat perusöljyn erottuminen, ja rasvan ajautuminen pidikkeestä kosketuskohtaan. Käyttöolosuhteista käyntilämpötila ja käynnin jaksollisuus vaikuttavat erottumiseen eniten. Perusöljyn viskositeetti laskee korkeassa lämpötilassa, jolloin öljyn erottuminen lisääntyy. Myös pitkät pysähdysjaksot lisäävät perusöljyn erottumista rasvasta. (Promaint 2013, s.44). Rasvavoitelussa suhteellisen pieni määrä voiteluainetta osallistuu itse voitelutapahtumaan. Normaali, jähkky rasva työntyy suurelta osin laakerista pois sijoittuen sen sivuille tai poistuen kokonaan tiivistimien kautta. Rasva, joka jää laakerin sivuille ja vierintäpinnoille, antaa tarvittavan määrän öljyä kosketuskohtien voiteluun. (FAG 1998, s.12)

Tärinä vaikuttaa eri lailla voitelutilanteeseen riippuen sen tasosta. Alhaisella tärinätasolla rasva ei liiku laakerissa ja akselin pyöriessä voitelutilanne muuttuu vielä huonommaksi, kun kosketuskohtaan ei tule uutta rasvaa. Tilannetta voidaan hallita säännöllisellä voitelulla. Jos tärinätaso nousee, voitelurasva alkaa liikkua laakerissa ja tällöin kosketuskohta saa uutta rasvaa, jolloin voitelutilanne paranee. Toisaalta erittäin korkea tärinätaso voi aiheuttaa rasvan voimakasta kiertokulkua laakerissa, mikä aiheuttaa rasvan pehmenemisen ja liiallisen perusöljyn erottumisen. Tällöin rasva tuhoutuu ennenaikaisesti. Kaikkien tilanteiden syntymiseen vaikuttaa tärinätason lisäksi ennen kaikkea käytetyn rasvan kiinteys. Voimakkaasti tärisevässä kohteessa tulee käyttää mekaanisesti kestäväää voitelurasvaa, joka on tyypillisesti saentimeltaan litiumsaippuapohjaista. (Promaint 2013, s.44)

Voitelukalvon paksuuden laskentaan käytetään rasvavoitelussa yleensä elastohydrodynaamista voiteluteoriaa ja rasvan perusöljyn viskositeettia. Käytännössä näitä laskennallisia kalvonpaksuuksia voidaan tarkastella karkeasti suuntaa antavina. Rasvavoitelussa kalvonpaksuus on suuruusluokaltaan noin 50 nm, kun öljyvoitelussa se on vastaavasti suuruusluokkaa 1 µm. Kalvonpaksuuteen vaikuttavat elastohydrodynaamisen voiteluteorian mukaiset tekijät sekä rasvan kulkeutuminen kosketuskohtaan. Kulkeutumiseen

vaikuttavat laakerin rakenne ja voitelurasvan perusöljyn viskositeetin lisäksi rasvan muut ominaisuudet (Promaint 2013, s.44). Kuvasta 4 nähdään, kuinka voitelukalvon paksuus muuttuu muutamassa minuutissa käynnistyksestä.



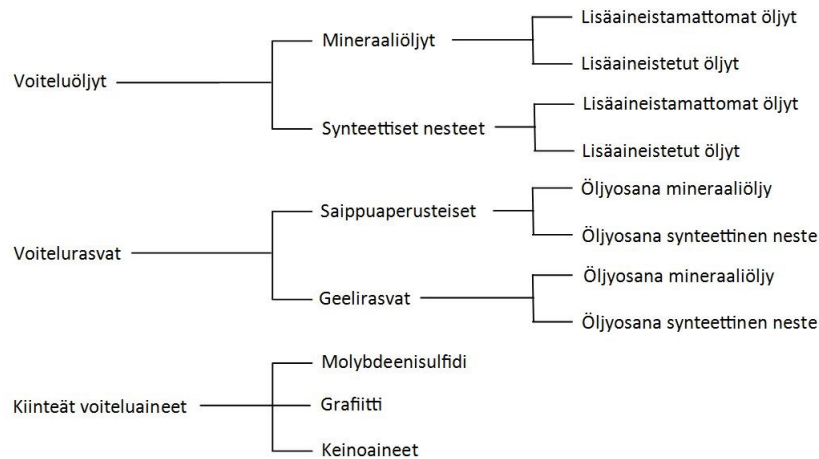
Kuva 4. Voitelukalvon paksuuden muutos laakerissa ajan suhteen. Alkutilanteessa laakeri on täytetty voitelurasvalla. Perustuu lähteeseen (Promaint 2013, s.45)

Alkutilanteessa laakeri on täytetty rasvalla ja kun käynti alkaa, vierintäelimet työntävät rasvan sivuun. Tällöin kalvonpaksuus h_{rasva} ohenee, kuten kuvasta 4 nähdään. Voitelurasvan kalvonpaksuus asettuu muutaman minuutin käynnin jälkeen tietylle tasolle, jos lisävoitelua ei ole saatavilla. Rasvavoitelun oleellinen ero öljyvoiteluun on voitelutilanteen muuttuminen ajan suhteen. (Promaint 2013, s.44)

2.4 Voiteluainetyypit

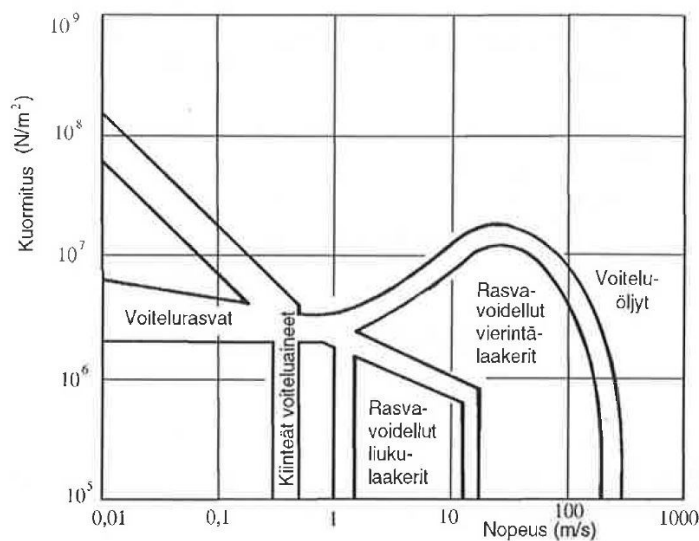
Voiteluaine on olennainen osa laitteen toimintaa ja se on suunniteltu toimimaan tietyissä olosuhteissa tietyn tyyppisissä laakereissa (Promaint 2013, s.49). Toisiaan vastaan liikkuvien pintojen välissä voiteluainekalvon muodostumista säätelevät aineen reologiset ominaisuudet, eli viskositeetin ja paineen vaikutus voiteluaineen koostumukseen. Kalvon muodostumisessa keskeinen ominaisuus on viskositeetti, joka on voiteluaineen leikkautumiseen tarvittavan jännityksen ja molekyylikerrosten liukumisnopeuden suhde. (Kivioja et. al. 2007, s.170)

Erilaiset voitelukohteet ja vallitsevat ympäristöolosuhteet asettavat voiteluaineille erilaisia vaatimuksia ja yleensä voiteluaineen tulee kyetä suorittamaan useampia tehtäviä samanaikaisesti. Yleisesti voiteluainetarkoituksiin käytettävät aineet voidaan ryhmitellä kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Voiteluaineiden ryhmittely. Perustuu lähteeseen (Kivioja et. al. 2007, s.171)

Periaatteessa voiteluaineeksi soveltuu mikä tahansa juokseva materiaali, oli sen olo-muoto kiinteä, neste tai kaasu. Nesteistä yleisimmin käytetty voiteluaine on öljy, koska se omaa hyvät viskoosit ominaisuudet. Myös vettä on mahdollista käyttää voiteluaineena, mutta sovellusmahdollisuuksia rajaavat sen korroosiota edistävä vaikutus sekä heikko lämmönkesto. Ilma on yleisin kaasumaisista voiteluaineista ja kiinteissä erilaiset rasvat. Kuvasta 6 nähdään voiteluaineiden soveltuvuus eri kuormituksille ja liukunopeuksille. (Kivioja et. al. 2007, s.170)



Kuva 6. Voiteluainetyyppien soveltuvuus eri kuormitusalueille ja liukunopeuksille. (Kivioja et. al. 2007, s.170)

Kuvan 6 antamat rajat ovat suuntaa antavia. Öljyvoitelussa viskositeetti on perustava ominaisuus ja se tulee valita oikein riippuen käyttölämpötilasta (Promaint 2013, s.49).

2.5 Voiteluöljyt

Valtaosa voiteluaineista on nestemäisessä olomuodossa ja yleisimmin ne ovat öljypohjaisia. Voiteluöljyjen perusöljyinä käytetään mineraali- ja kasviöljyjen lisäksi synteettisiä öljyjä. Jokaisesta raaka-aineesta ja niiden jalostusmenetelmästä löytyy hyviä ja huonoja ominaisuuksia. (Promaint 2013, s.55)

Voiteluaineiden valmistukseen soveltuvien raakaöljyjen tulee olla ominaisuuksiltaan parempilaatuisia kuin esimerkiksi lämmitysöljyissä käytettävän raakaöljyn. Lopputuotteen lisäksi lisätään myös erilaisia lisäaineita, joilla saadaan parannettua öljyn fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia.

2.5.1 Mineraaliöljyt

Mineraaliöljyjen valmistus tapahtuu raakaöljyä tyhjiötislaamalla ja puhdistamalla. Raakaöljyt eroavat koostumuksiltaan jopa lähdekohtaisesti. Sopivimmat raakaöljyt voiteluaineiden perusöljyjen valmistukseen omaavat pienen rikki- ja aromaattipitoisuuden ja hyvän stabiilisuuden (esimerkiksi kemiallinen kestävyys hapettumista vastaan). (Promaint 2013, s.55)

Tärkeä ominaisuus mineraaliöljyllä on hiilivetykoostumus, joka vaikuttaa muun muassa viskositeetti-indeksiin, tiheyteen sekä jähme- ja leimahduspisteeseen. Parafiinisten (tyydytettyjä ketjumaisia), nafteenisten (tyydytettyjä rengasrakenteisia) ja aromaattisten (tyydyttämättömiä rengasrakenteisia) hiilivetyjen osuuksien mukaan raakaöljyä nimitetään joko parafiini- tai nafteeniperustaiseksi. Aromaattiset hiilivedyt ovat suurina pitoisuuksina haitallisia voiteluaineissa ja tyypillisesti voiteluaineen perusöljy sisältää niitä alle 10 %. Hiilivetyjen parafiinisuuden ja nafteenisuuden eroavaisuudet saavat aikaan lopputuotteessa erilaisia ominaisuuksia. Suurimmassa osassa mineraaliperustaisista voiteluöljyistä käytetään parafiinista perusöljyä, mutta perusöljyn hiilivetykoostumus valitaan voiteluaineen käyttökohteen ja lopputuotteelle haluttujen ominaisuuksien mukaan. (Kara 1989, s.27; Promaint 2013, s.55)

2.5.2 Synteettiset öljyt

Voiteluaineen valmistuksessa voi käyttää raakaöljystä valmistettua mineraaliperusöljyä tai vaihtoehtoisesti raakaöljystä kemiallisella prosessilla valmistettuja synteettisiä nesteitä. Synteettisiä hiilivetyjä ovat polyalfaolefiini (PAO) ja alkyylisentseenit.

Lisäaineistettuna polyalfaolefiinillä on hyvä hapettumisenestokyky ja hyvät viskositeettiominaisuudet niin kylmässä kuin kuumassakin. PAO-perustaiset nesteet soveltuvat todella hyvin melkein kaikkien voiteluaineiden valmistukseen, kuten kompressor- ja hydraulioöljyihin, voitelurasvojen perusöljyihin sekä kiertovoiteluöljyihin. (Promaint 2013, s.58)

2.6 Voitelurasvat

Voitelurasvat ovat vakiinnuttaneet asemansa toiseksi yleisimpänä voiteluaineryhmänä voiteluöljyjen jälkeen. Tribologisesti tarkasteltuna voitelurasvat eivät tuo etuja öljyihin verrattuna. Normaaliolosuhteissa rasvoilla on kuitenkin paremmat tiivistysominaisuudet kiinteytensä ansiosta. Voitelurasvojen tapauksessa niiden voitelumekanismit ovat huommin tunnettuja kuin öljyjen johtuen osittain rasvan jäykkyyden aiheuttamien virtausteknisten rajoitusten vuoksi. Rasvavoidellun vierintälaakerin voitelukalvo on pääsääntöisesti ohuempi verrattuna öljyvoideltuun laakeriin. (Promaint 2013, s.66)

Rakenteeltaan voitelurasvat ovat saentimeen sitoutettuja öljyjä, mikä erottaa ne paksuista öljyistä. Nykyaikainen voitelurasva muodostuu kolmesta pääkomponentista: perusöljystä ja siihen huonosti liukenevasta, hienojakoisesta saentimesta sekä lisäaineista. Rasvan saennin osallistuu voitelutapahtumaan, vaikka se samalla on pehmeisiin epäpuhtaushiukkasiin rinnastettava komponentti. Lisäaineiden avulla parannetaan rasvan voiteluominaisuuksia, suorituskykyä sekä kestoikää. Kolmen pääkomponentin kokonaisuus yhdessä määräävät voitelurasvan käyttöominaisuudet. Voitelurasvojen yleisnimenä ei tule käyttää nimitystä vaseliini, koska sillä tarkoitetaan hiilivetyseoksia, joiden sulamislämpötila on noin 40–45 °C. (Promaint 2013, s.66)

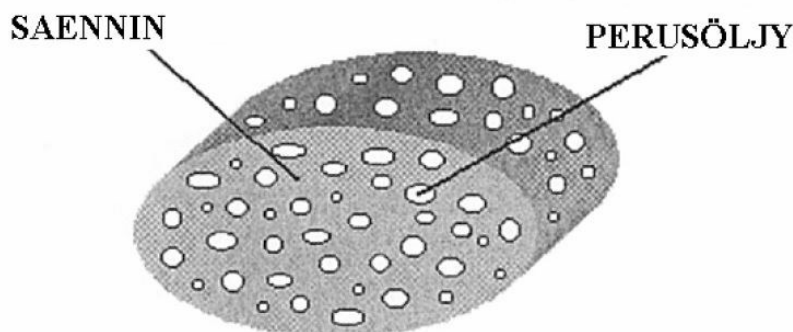
Voitelurasvojen käyttöä ja ominaisuuksia pyritään jatkuvasti kehittämään kansainvälisillä tutkimuksilla ja testeillä. Standardoidut testimenetelmät ja eri laakerivalmistajien laakerikokeet auttavat määrittämään ja kehittämään voitelurasvojen suorituskykyä. Alan keskusorganisaationa toimii NLGI (National Lubrication Grease Institute), joka on osallistunut kehitystyöhön jo vuodesta 1933. (Promaint 2013, s.66)

Kulutus voitelurasvojen osalta on voiteluöljyihin verrattuna huomattavasti pienempää niin globaalisti kuin kansallisesti tarkasteltuna. Tämä johtuu muun muassa pienistä rasvantäyttötilavuuksista ja pitkistä jälkivoiteluväleistä. Rasvavoitelua käytetään erityyppisissä sovelluksissa, joista vaativimpiin ja kriittisimpiin kuuluvat vierintälaakerit. Niissä muodostuvaan huomattavan ohueen voitelukalvoon kohdistuu erittäin suuri pintapaine. Maailman vierintälaakereista suurin osa on rasvavoideltuja, joiden voitelu on toteutettu kestovoiteluna, keskusvoiteluna tai jaksottaisesti jälkivoiteluna. Jälkivoitelun avulla uusi rasva syrjäyttää vanhan rasvan sekä siihen kerääntyneen lian, kosteuden ja kulumispartikkelit. Tällä saadaan osittain korvattua rasvan suodattamattomuus käytön aikana. (Promaint 2013, s.66)

2.6.1 Perusöljyt

Voitelurasvan koostumuksesta suurin osa (noin 90 %) on perusöljyä, joka vaikuttaa eniten rasvan voiteluominaisuuksiin. Rasvan valintaprosessin periaate on valita sellainen rasva, jonka perusöljyn tyyppi ja sen viskositeetti ovat samat kuin vastaavanlaiseen öljyvoideltuun kohteeseen valittavan voiteluöljyn viskositeetti. Rasvan jäykkyys valitaan

voitelukohteen perusolosuhteiden, kuten lämpötilan, geometrian, värähtelyiden sekä voitelutoteutustavan mukaan. Rasvan jäykkyyteen vaikuttaa perusöljyn lisäksi saentimen tyyppi ja määrä (Promaint 2010, s.6). Kuvasta 7 voidaan hahmottaa rasvan rakenne.



Kuva 7. Rasvan perusrakenne. (Miettinen 2001)

Voitelurasvaksi valitaan käyttötarkoitusten ja olosuhteiden mukaan joko synteettis- tai mineraaliöljyperustainen rasva. Suuri osa teollisuudessa käytettävistä rasvoista on mineraaliöljyperustaisia. Kylmiin ja kuumiin käyttökohteisiin valitaan synteettisiin perusöljyihin perustuvia rasvoja, koska perusöljy omaa mineraaliöljyä paremman viskositeettindeksin. Näin taataan rasvoille lämpimissä käyttöolosuhteissa parempi suorituskkyky ja kylmissä olosuhteissa pienempi kitka. Tässä työssä synteettisillä perusöljyillä tarkoitetaan lähinnä PAO- ja esteriperustaisia perusöljyjä. (Promaint 2010, s.6)

Korkeisiin, yli 200 °C:n, käyttölämpötiloihin soveltuvat silikoniöljy- ja fluoriöljyperustaiset rasvat. Näiden käytössä on kuitenkin huomioitava rasvan käytön erikoisvaatimukset. Silikoniöljyperustaisia rasvoja ei voida käyttää esimerkiksi maalaamoissa niiden maalin tarttuvuutta heikentävän ominaisuuden takia. Fluoriöljyperustaisten rasvojen kanssa tulee huomioida voideltavan kohteen puhtaus, jotta rasva tarttuu voitelupinnoille. Joidenkin esteriperustaisten rasvojen kanssa ongelmaksi voi muodostua aggressiivinen reagointi tiettyjen tiivistinmateriaalien kanssa. (Promaint 2010, s.6)

2.6.2 Saentimet ja lisäaineet

Perusöljyn ohella rasvan perusrakenteen muodostavat myös saentimet. Saentimina käytetään metallisaippuoita, metallikompleksisaippuoita sekä ei-saippuapohjaisia orgaanisia tai epäorgaanisia yhdisteitä. Saippuaksi kutsutaan emäksen ja rasvahapon muodostamaa suolaa, esimerkiksi litiumhydroksidia ja steariinihapon seosta. Kompleksisaippua taas muodostuu emäksestä ja kahdesta tai useammasta rasvahaposta. Saennintyyppit eroavat toisistaan ominaisuuksiltaan ja toiminnaltaan, joten saennintyyppi valitaan rasvan käyttötarkoituksen perusteella (Promaint 2010, s.6). Taulukkoon 2 on koottu eri saennintyyppisiä ja niiden ominaisuuksia.

Taulukko 2. Rasvojen saennintyyppit ja niiden ominaisuudet. (Promaint 2010, s.6–7)

Saennintyyppi	Ominaisuudet
Litium	Litiumrasvat ovat yleisimmin käytettyjä voitelurasvoja. Ne omaavat hyviä ominaisuuksia, kuten leikkautumiskestävyys, lämpötilankesto, tiivistinominaisuudet, korroosionesto- ja vedensietokyky. Myös käyttölämpötila-alue on litiumrasvoilla melko laaja. Ne tarjoavat lisäksi hyvät lähtökohdat vaikuttaa rasvan ominaisuuksiin lisäaineiden avulla.
Kalsium	Kalsiumrasvat omaavat hyvät ominaisuudet veden vaikutusta vastaan. Ne pystyvät vastustamaan emulgoitumista veden kanssa, minkä ansiosta ne eivät peseydy helposti pois voitelukohteesta. Kalsiumrasvoja voidaan käyttää myös kylmissä olosuhteissa, maksimikäyttölämpötila rajoittuu 90 °C:een.
Kompleksiset	Kestävät korkeampia lämpötiloja kuin perinteiset saippuarasvat. Kompleksisaentimiin perustuvien rasvojen käyttö on yleistynyt vaativimmissa voitelukohteissa ja vedensietokyky on saippuarasvoja parempi. Kompleksirasvojen yleisimmät saentimet ovat kalsium-, litium- ja alumiinikomplekseja. Käyttölämpötilat näillä rasvoilla voivat olla jopa 150–170 °C.
Orgaaniset	Tyypillisesti polyureakuituja tai hienojakoista polytetrafluorietyleniä (PTFE). Näilläkin saentimilla rasvalle saadaan hyvät veden- ja lämmönkesto-ominaisuudet. Näiden avulla rasva omaa pitkän eliniän vaativissakin olosuhteissa. Tämän tyyppisiä rasvoja käytetäänkin usein kertavoideltujen laakerien voiteluaineina, jolloin vältetään rasvan lisäämiseltä tai vaihtamiselta laakerin käyttiän aikana. Polyurearasvojen heikot pumpattavuusominaisuudet rajoittavat niiden käyttöä keskusvoitelujärjestelmissä. Monet PTFE-saenninta ja fluoriöljyä sisältävät rasvat kestävät jopa 250 °C:n käyttölämpötilat.
Epäorgaaniset	Yleisin epäorgaaninen saennin on betoniittisavi, jota sisältävät rasvat omaavat laajan käyttölämpötila-alueen. Betoniittisavi antaa rasvoille kyvyn vastustaa olomuotomuutoksia, koska muun muassa sulamispiste puuttuu niiltä kokonaan. Toinen, ei-saippuaperusteinen rasva on silikonirasva. Perusöljynä tässä rasvassa voidaan käyttää esimerkiksi silikoniöljyä ja saentimena silikageeliä.

Saentimet eivät pelkästään muuta voiteluöljyjä rasvoiksi, vaan ne myös vaikuttavat voiteluöljyjen ominaisuuksiin. Kun otetaan huomioon kaikki saentimia koskevat ominaisuudet, ei yksikään kaupallisesti tärkeä saennin erotu edukseen. Ne ovat keskenään kilpailukykyisiä ja tarkoitettuja tiettyihin sovelluksiin. Eroavaisuudet näkyvät pääasiassa saentimille tehtyjen erikoisvaatimuksien kautta. (Mang & Dresel 2007, s. 651)

Rasvan perusrakenneosien, eli perusöljyn ja saentimen lisäksi voitelurasvan rakenteen muodostavat myös lisäaineet. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa perusöljyn ohella rasvan voiteluominaisuuksiin ja käyttöikänsä. Hynösen (2005, s.8) mukaan lisäaineet voivat vaikuttaa joko fysikaalisesti voideltaviin pintoihin tarttumalla tai muodostamalla kemiallisessa reaktiossa pintojen kanssa uuden yhdisteen. Lisäaineita valittaessa otetaan huomioon käyttökohteen erityistarpeet, joita voivat olla suorituskyvyn parantaminen, pintapaineen keston (EP) lisääminen, kulumisen esto (AW), rasvan hapettumisen esto, korroosion esto, ympäristönäkökohdat, yhteensopivuus pääkomponenttien ja muiden lisäaineiden kanssa sekä väri ja hinta. (Promaint 2013, s.71)

Voitelurasvojen tapauksessa hapettuminen saattaa olla voiteluöljyjä suurempi ongelma, koska toisinaan saippuarasvojen saentimissa olevat metalliatomit toimivat katalyytteinä hapettumisreaktioissa aiheuttaen rasvan ennenaikaista vanhenemista. Tällöin myös lisäannostus korroosionestoainetta voi olla tarpeen, koska saentimen lisääminen aiheuttaa perusöljyn omien korroosionesto-ominaisuuksien heikkenemisen. (Promaint 2013, s.71)

Kulumisenestoaineita lisätään pääasiassa kaikkiin voiteluaineisiin, joita suunnitellaan käytettävän puhtaan hydrodynaamisen voitelun ulkopuolella. AW- ja EP-lisäaineita kutsutaan yleisesti rajavoitelulisäaineiksi. Lisäaineita tulee käyttää harkiten, koska parantamalla yhtä ominaisuutta voi huonontaa muita ominaisuuksia. Esimerkiksi EP-lisäaineistusta kasvattamalla pienenevät muun muassa voiteluaineen lämmönkesto, vedenerotuskyky ja korroosionesto. (Hynönen 2005, s.9)

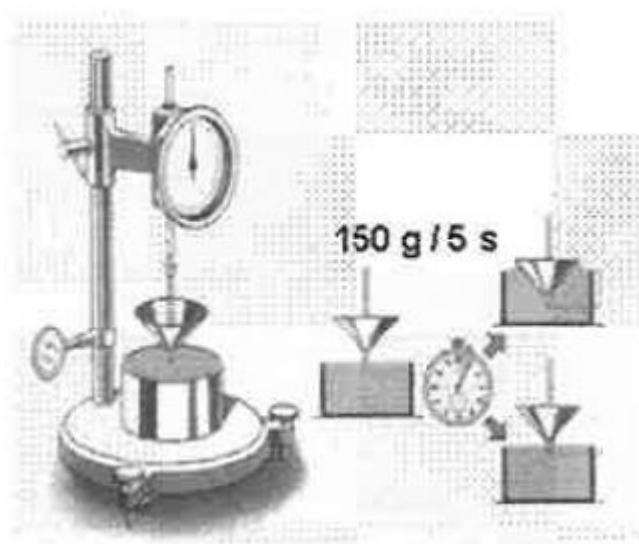
Rasvoihin, joita käytetään todella raskaasti kuormitetuissa kohteissa, lisätään usein kiinteitä voiteluaineita, joista yleisimmin käytettyjä ovat molybdeenidisulfidirasvat (MoS_2 -rasvat). Niiden tarkoituksena on parantaa rasvan voitelukykyä rajavoitelutilanteessa. MoS_2 -rasvojen ohella lisäaineena käytetään myös grafiittia. (Promaint 2013, s.71)

2.6.3 Testausmenetelmät

Voitelurasvan koostuessa aina kahdesta faasista, toiminnalliseen testaukseen ja laadunvarmistukseen joudutaan käyttämään useita erilaisia testausmenetelmiä, jotka täydentävät toisiaan. Testausmenetelmiä on kehitetty muun muassa rasvan kovuusluokan, korroosiosuojan ja voitelukyvyn määrittämiseksi.

Rasvan tunkeuma kuvaa sen kovuutta. Kovuusluokka on mitta-arvo, jolla suhteutetaan voitelurasvan jäykkyys ja se ilmoitetaan yhdeksänä NLGI-luokkana, jotka on määritelty

25 °C:n lämpötilassa. Rasvan kovuus mitataan yleensä vatkatuna kartiotunkeumakokeella. Kokeessa voitelurasvaan lasketaan massaltaan 150 grammainen standardikartio, joka tunkeutuu rasvaan 25 °C:n lämpötilassa viiden sekunnin ajan. Tunkeuma mitataan sekä vatkatusta että vatkamattomasta rasvasta. Kokeessa käytettävä penerometri nähdään kuvassa 8. (Promaint 2010, s.9; Parikka & Sainio 2004, s.27)



Kuva 8. Tunkeumakokeessa (DIN 51804) käytettävä penerometri. (Promaint 2010, s.10)

Tunkeuma ilmoitetaan kymmenesosamillimetreinä, mikä suhteutetaan tiettyyn NLGI-luokkaan (Parikka & Sainio 2004, s.27). Taulukosta 3 nähdään NLGI-luokat ja niitä vastaavat tunkeumat.

Taulukko 3. Rasvojen NLGI-luokat. (Promaint 2013, s.81)

NLGI-luokka DIN 51818	Tunkeuma [1/10 mm] DIN 51804	Rasvan luokitus
000	445–475	Juokseva
00	400–430	
0	355–385	
1	310–340	Pehmeä
2	265–295	
3	220–250	
4	175–205	Kova
5	130–160	
6	85–115	

On huomioitava, ettei NLGI-luokitus ota kantaa voitelurasvan suorituskykyyn (Promaint 2010, s. 9). NLGI:n luoma konsistenssiluokkajärjestelmä on nykyisin käytössä maailmanlaajuisesti mitattaessa rasvojen kovuutta (Promaint 2013, s.81).

Rasvan jäykkyys alhaisessa lämpötilassa on määritettävissä erillisellä vääntömomenttikokeella. Pumppautumisominaisuuksia voidaan mitata esimerkiksi virtauspaineekokeella DIN 51805 sekä pumpattavuustestillä PSK 7202. (Parikka & Sainio 2004, s.27)

Voitelurasvojen korroosionestokyky voidaan testata niin sanotulla Emcor-kokeella DIN 51802. Kokeessa laakerissa käytetään voitelurasvan ja tislattun veden seosta ja kokeen jälkeen arvioidaan syntyneet korroosiovauriot. Kokeesta saa erilaisia variaatioita käyttämällä tislattun veden sijasta esimerkiksi suolavettä. (Parikka & Sainio 2004, s. 27)

Voitelukykyä rasvojen tapauksessa voidaan testata erilaisilla ASTM- ja DIN-standardien mukaisilla kokeilla, kuten DIN 51821 tai 51834. Nelikuulakokeella DIN 51350 testataan voitelurasvan EP-ominaisuuksia. Kokeessa kolme kuulaa asetetaan rasvakuppiin ja neljättä kuulaa pyöritetään niitä vastaan tietyllä nopeudella, nostaen kuorimitusta asteittain, kunnes pyörivä kuula hitsautuu kiinni paikalla oleviin kuuliin. Tuloksena saatava voitelurasvan paineenkesto ilmoitetaan Newtonina. (Promaint 2010, s.10; Parikka & Sainio 2004, s.28)

Öljyn erottumistestillä saadaan tietoon rasvan herkkyys perusöljyn vuotamiselle. Testijärjestelyssä painon alla oleva voitelurasva laitetaan viikon ajaksi uuniin, jonka lämpötila on 40 °C. Rasvasta vuotanut perusöljy punnitaan, ja vuodon määrä ilmoitetaan prosentteina standardin DIN 51817 mukaisesti. (Parikka & Sainio 2004, s.29)

2.7 Keskusvoitelujärjestelmät

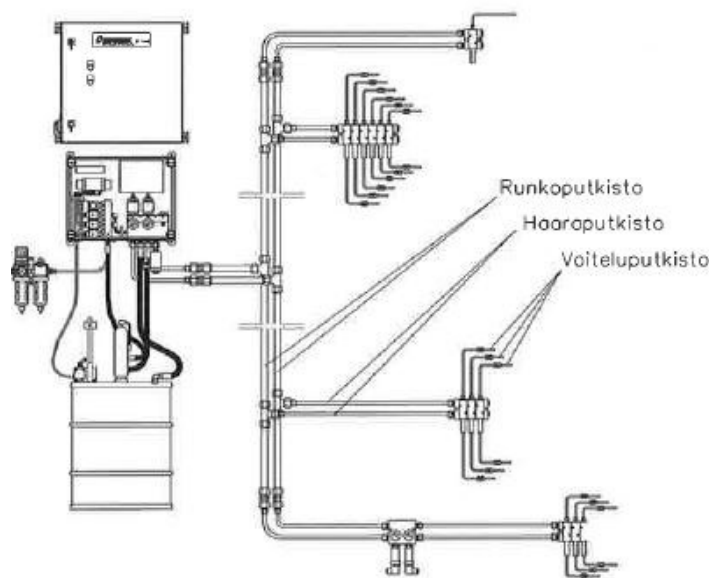
Keskusvoitelujärjestelmä annostelee voiteluainetta automaattisesti voitelukohteille koneen ollessa ajossa. Voiteluainetta pumpataan tietyn ajan välein tarvittava määrä voitelua kaipaaviin kohteisiin. Kun voitelu tapahtuu konetta käyttäessä, voiteluaine levittyy tasaisesti liikkuvien osien voideltaville pinnoille. (YTM 2016a)

Keskusvoitelujärjestelmä muodostuu ohjausyksiköstä, putkistosta, jakajaryhmistä ja paineenvalvontayksiköstä. Järjestelmissä, joissa on useampia kanavia, käytetään sulkuventtiilejä erottamaan kanavat toisistaan tai erillisistä pumppauskeskuksista. Ohjausyksikön avulla ohjataan voitelutoimintaa määrättyjen voitelujaksojen ja paineistusaikojen mukaan. Yksikkö antaa hälytyksen mahdollisista häiriöistä toiminnan aikana. Ohjausyksikkö voi ohjata yhtäaikaaisesti useampaa voitelukanavaa ja tallentaa voitelutapahtumien seurantadataa. Keskusvoitelujärjestelmän ohjaus voidaan toteuttaa myös prosessin tai koneen oman ohjausjärjestelmän avulla. (Promaint 2013, s.228)

Pumppausyksikkö koostuu voiteluainesäiliöstä, suuntaventtiiliyksiköstä ja tavallisesti paineilmatoimisesta pumpusta. Joissakin järjestelmissä käytetään paineilmatoimisen pumpun tilalla sähkö- tai hydraulitoimista pumppua. Yksikköön kuuluu myös rasvasuodin ja pumpputyypistä riippuen erilaiset säätömahdollisuudet. Paineistuksen alkaessa ohjausyksikkö käynnistää voiteluainepumpun ja jatkaa paineistusta, kunnes pai-

neenvalvontayksikkö saavuttaa kuittauspaineen. Tämän jälkeen ohjauskeskus pysäyttää pumpun ja paine purkautuu voiteluainesäiliöön. Pumppauksen aikana voiteluaineen pinnan laskiessa säiliössä hälytysrajalle alarajakytkin antaa hälytyksen ohjausyksikölle, joka sammuttaa pumpun. (Promaint 2013, s.228)

Putkiston mitoitus ja materiaalien valintaa ohjaavat voitelujärjestelmän laajuus, vallitsevat olosuhteet sekä käytettävän voiteluaineen ominaisuudet, kuten pumpattavuus. Putkiston mitoitukseen on olemassa erilaisia laskentaohjelmia ja standardista PSK 7202 saa lisätietoa voiteluaineiden pumpattavuudesta. (Promaint 2013, s.228) Kuvassa 9 nähdään keskusvoitelujärjestelmän putkiston osat ja niiden nimitykset.



Kuva 9. Keskusvoitelujärjestelmän putkistojen nimitykset. (Promaint 2013, s.228)

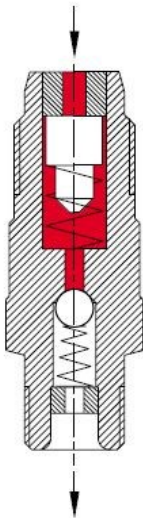
Järjestelmän annostinryhmät koostuvat pääsääntöisesti pohjalaatasta ja siihen kiinnitteistä annostimista. Pohjalaatta jakaa voiteluaineen voitelukohteille annostimien kautta ja ne voidaan varustaa joko visuaalisella tai sähköisellä valvonnalla. (Promaint 2013, s.229)

Paineistuksen aikana paineenvalvontayksikkö valvoo järjestelmän toimintaa mittaamalla painetta voiteluaineessa samanaikaisesti lähettäen tietoa ohjausyksikölle. Mikäli paine ei saavuta asetettua arvoa paineistuksen aikana, ohjausyksikkö antaa hälytyksen. (Promaint 2013, s.229)

Sulkuventtiilejä käyttämällä voidaan voitelujärjestelmässä saman pumppausyksikön alaisuudessa olevat kanavat erottaa toisistaan. Paineistuksen ajaksi ohjausyksikkö avaa käytettävän kanavan sulkuventtiilin. Sulkuventtiilin ohjaus voidaan toteuttaa myös laitteen käyntitiedon avulla, jolloin voideltava laite käynnistyessään avaa sulkuventtiilin ja mahdollistaa voitelun laitteessa paineistuksen aikana. (Promaint 2013, s.229)

2.7.1 Yksilinjainen järjestelmä

Yksilinjaisen keskusvoitelujärjestelmän linjan paineistuessa annostelijan mäntä työntää voiteluaineannoksen voitelukohteelle. Kun paine laskee linjassa, jousi palauttaa männän takaisin lähtöpisteeseen, ja annostelija latautuu seuraavaa voitelutapahtumaa varten. Annostelijoita voi valita erikokoisia ja ne ovat säädettävissä voitelukohteen mukaan (Promaint 2013, s.230). Kuvassa 10 on periaatekuva yksilinjaisen järjestelmän annosteluventtiilistä.

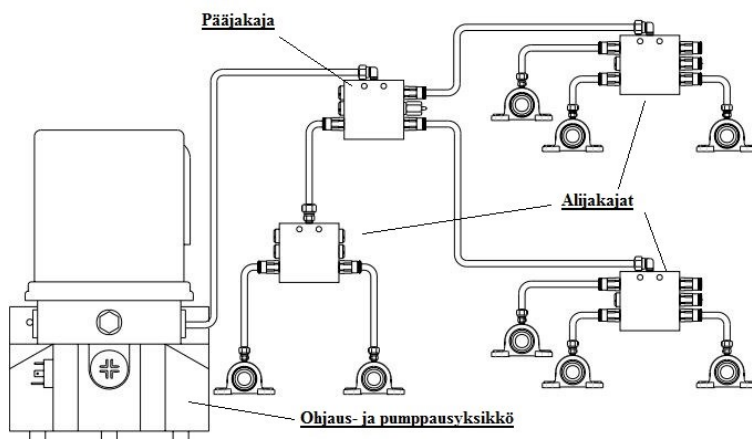


Kuva 10. Yksilinjaisen keskusvoitelujärjestelmän annosteluventtiilin periaatekuva.
(FAG 1998)

Yksilinjaisia järjestelmiä voidaan käyttää erilaisten tehtaiden koneissa ja laitteissa, joissa voiteluaineena käytetään puolijuoaksevia rasvoja aina NLGI 1 -luokkaan asti. Koneet voivat olla esimerkiksi puunkäsittelylaitteita, kuljettimia tai liikkuvaa kalustoa. (Promaint 2013, s.230)

2.7.2 Progressiivinen järjestelmä

Myös progressiivinen järjestelmä on tyypiltään yksilinjainen keskusvoitelujärjestelmä. Erona perinteiseen järjestelmään ovat sen progressiiviset jakajat. Jakaja siirtää voiteluainetta voitelukohteille taukoamatta, jos voiteluaineen syöttöä jakajalle ei katkaista. Progressiivisen järjestelmän rakenne on yleensä kaksitasoinen, jolloin käytetään yhtä tai useampaa pääjakajaa, joiden kautta voiteluaine jaetaan alijakajille (Promaint 2010, s.45). Progressiivisen järjestelmän osat ovat nähtävissä kuvasta 11.



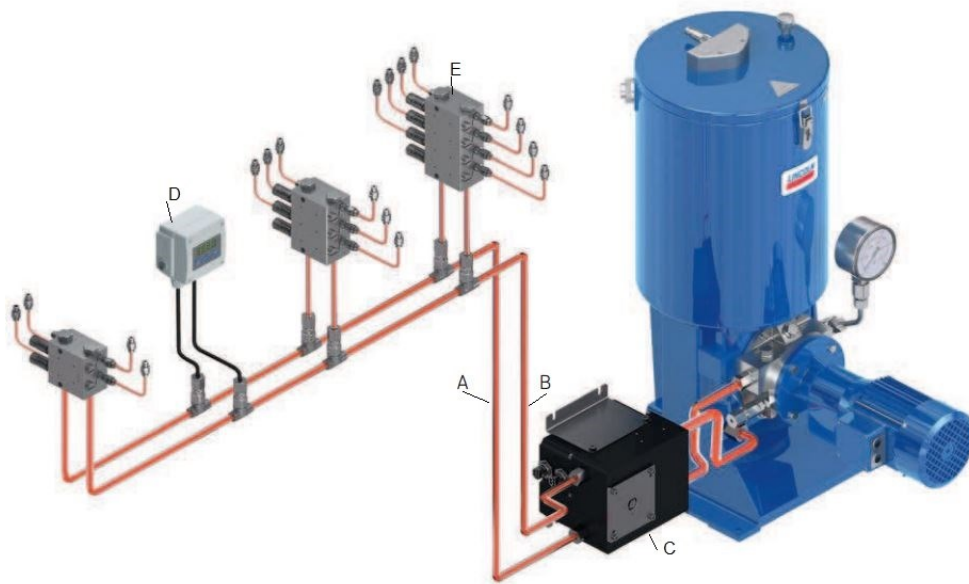
Kuva 11. Progressiivinen keskusvoitelujärjestelmä. Perustuu lähteeseen (YTM 2016b)

Progressiivisia jakajia voidaan käyttää yksi- ja kaksilinjaisten järjestelmien osana jakamaan voiteluannos voitelukohteelle. Yleisiä käyttökohteita progressiivisille jakajille ovat pieniä kerta-annoksia vaativat kohteet, kuten liukupinnat, johteet ja nivelet. Progressiivisissa voitelujärjestelmissä voidaan käyttää NLGI 2 -luokan tai sitä juoksevia voitelurasvoja. (Promaint 2013, s.230)

2.7.3 Kaksilinjainen järjestelmä

Kaksilinjaisen keskusvoitelujärjestelmän toiminta perustuu molempien runkolinjojen paineistamiseen vuorotellen. Paineistusvaiheessa linjan paine nousee, ja annostelijan luisti liikkuu ääriasentoon voiteluaineen siirtäessä mäntää. Mäntä työntää siirtyessään voiteluaineen voitelukohteelle ja paineistuksen loputtua paine purkautuu voiteluainesäiliöön. Kun pumppu käynnistyy uudelleen, paineistuu toinen linja, ja voiteluaine ohjautuu luistin kautta männän toiselle puolelle. Taas voiteluaine työntyy voitelukohteelle männän siirtyessä. Myös kaksilinjaisen järjestelmän annostelijoita on olemassa erikoisia ja niitä voidaan säätää erikseen voitelukohteen tarpeen mukaan. (Promaint 2013, s.229)

Kaksilinjaisia voitelujärjestelmiä käytetään yleisesti laajoissa rasvavoitelujärjestelmissä, joissa vaaditaan voitelujärjestelmältä korkeaa luotettavuutta (Promaint 2013, s.229). Kuvassa 12 on esitelty kaksilinjaisen voitelujärjestelmän komponentit.



Kuva 12. Kaksilinjaisen voitelujärjestelmän komponentit. (perustuu lähteeseen SKF 2015a)

Kaksilinjainen järjestelmä koostuu yleensä pumppausyksiköstä (F), sulkuventtiilistä (C), kahdesta painelinjasta (A ja B) sekä paineenvälvontayksiköstä (D) ja annostelijaryhmistä (E). Näissä järjestelmissä voidaan käyttää progressiivisen tavoin voitelurasvoja luokkaan NLGI 2 asti (Promaint 2013, s.229).

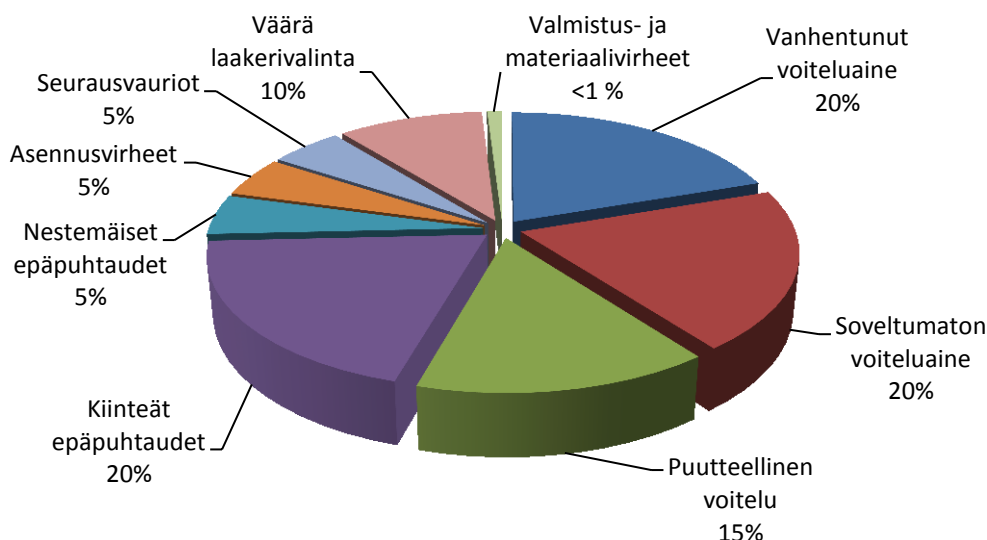
3. KONE-ELINTEN RASVAVOITELU

Rasvavoitelu on yleisin käytössä oleva voitelutapa, jonka erityispiirteenä on, että rasvala voidaan tukea tiivistimien toimintaa. Sillä ei kuitenkaan voida siirtää lämpöä pois voitelukohteesta. Mikäli rasvan käyttöikä on riittämätön kestovoiteluun, tulee vanha rasva korvata vaihtamalla rasva uuteen tai suorittamalla jälkivoitelu määrätyn ajan välein. Jälkivoitelua käyttämällä rasva vaihtuu vain osittain voitelukohteessa ja rasvan huuhteluefektin puuttuessa kulumapartikkelit jäävät kohteeseen, mikä aiheuttaa kumulatiivista kulumista, rasvan hapettumista ja käyttöiän lyhentymistä. (Promaint 2010, s.13)

Jälkivoitelun edellytyksenä on rasvan ohjaaminen sisään ja puristaminen voitelukohteeseen. Poistumistie vanhalle rasvalle tulee olla esteetön. Ylimääräinen rasvan pakkautuminen ja vatkautuminen kohteessa kasvattavat lämpötilaa ja käyntivastusta. Koneen loppukäyttäjä voi omilla voiteluohjeistuksilla ja käytännön toteutuksilla vaikuttaa voitelun laatutasoon. Ei pidä myöskään unohtaa voiteluaineen puhtauden merkitystä varastoinnissa ja jakelussa. Lisäksi voitelulaitteiden toimintaa tulee seurata niiden toimivuuden varmistamiseksi. (Promaint 2010, s.13)

Yleisin voitelukohde on laakeri. Tyypillisesti käytettäviä laakereita ovat vierintä- ja lineaarilaakerit sekä liuku- ja nivellaakerit. Pyörivissä kone-elimissä käytetään yleensä vierintälaakereita. Kaikkia laakerityyppejä on saatavilla niin jälkivoideltavina kuin kestovoideltuina eli huoltovapaina laakereina. (Promaint 2010, s.14)

Sovelluskohtaisesti oikealla voitelulla voidaan parantaa laitteiden käyttövarmuutta ja alentaa kunnossapidon kustannuksia (Promaint 2010, s.14). Kuten kuvasta 13 nähdään, suurin osa vierintälaakerien vaurioitumisesta johtuu soveltumattomasta tai puutteellisesta voitelusta. Erityisesti manuaalivoitelun piirissä olevat kohteet ovat ongelmallisia (Promaint 2010, s.14).

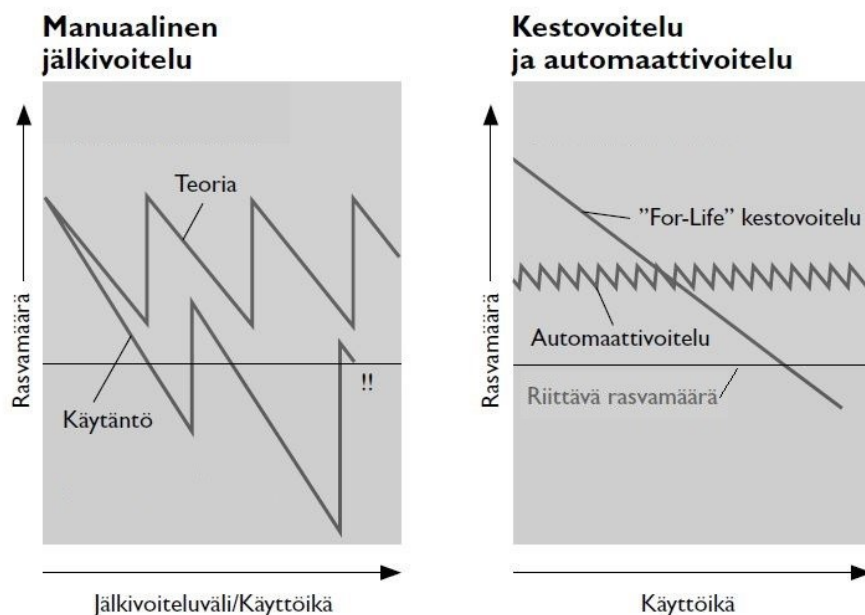


Kuva 13. Ennen aikaisten vierintälaakerivaurioiden syyt teollisuudessa. Perustuu lähteeseen (Katz 2012)

3.1 Rasvavoitelutavan vaikutus

Rasvavoitelun toteutustapana voidaan käyttää joko kestovoitelua tai jälkivoitelua. Kestovoitelu on luotettava ja edullinen, mikäli valitut kestovoidellut laakerit täyttävät käyttökohteen asettamat vaatimukset rasvatäytölle ja tiivistykselle. Ongelmaksi kestovoideluissa laakereissa tulee rasvan käyttöiän rajallisuus. Jos ongelmia ilmenee, tulee käyttökohteesta tarkistaa jatkuva käyttölämpötila, pyörimisnopeus sekä varmistaa kestovoidelun laakerin rasvan soveltuvuus kohteeseen. (Promaint 2010, s.19)

Jälkivoitelu on mahdollista toteuttaa manuaalisesti tai erityyppisillä voiteluautomaateilla. Manuaalivoitelun ongelmana on helposti pitkäksi venyvät jälkivoiteluvälit, joita yritetään kompensoida isommilla rasvamäärillä. Automaattivoitelussa jälkivoiteluvälit voidaan säätää lyhyemmiksi ja rasvamäärät oikeiksi jokaiselle yksittäiselle voitelutapahetkelle. Manuaalivoitelun epävarmuutta lisäävät jälkivoiteluvälien ja rasvamäärien lisäksi rasvan säilyvyys varastoinnin aikana ja puhtaustason säilyttäminen rasvaa käsiteltäessä. (Promaint 2010, s. 20) Kuvasta 14 nähdään rasvavoitelutavan vaikutus voitelun toimivuuteen.



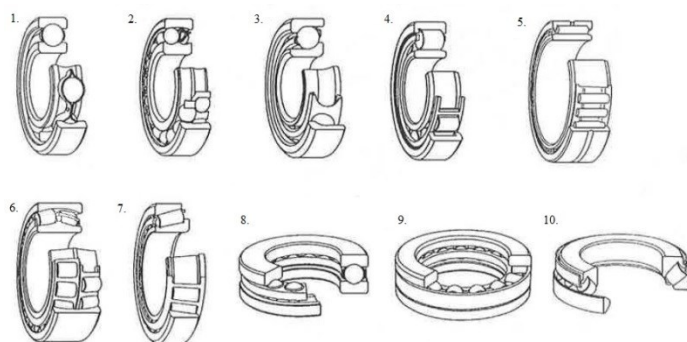
Kuva 14. Rasvavoitelutavan vaikutus voitelun toimivuuteen. Perustuu lähteeseen (Jauhiainen 2008, s.42)

Riskeinä pitkissä jälkivoiteluväleissä ovat puutteellinen voitelu ja rasvan vanhentuminen. Kun huuhteluefekti puuttuu, kulumapartikkelit eivät poistu voitelukohteesta. Tästä johtuen rasva hapettuu ja menettää voitelukykynsä nopeasti. Kulumapartikkelit aiheuttavat myös laakerin ennen aikaisen väsymisen, vaikka voitelutiheyttä ja voiteluaineen määrää kulumisen havaitsemisen jälkeen lisättäisiin. Rasvan hapettumisen ja laakerin kulumisen tunnistaa rasvan voimakkaasta tummumisesta. Manuaalivoitelussa voiteluhuollon resurssit, voitelukohteiden suuri määrä ja muut kustannuksia lisäävät tekijät aiheuttavat kompromissiratkaisuja ja nämä taas ilmenevät ongelmina vaativissa voitelukohteissa. (Promaint 2010, s.20)

Laitteen samantyyppisten voitelukohteiden, esimerkiksi päälaakerien, voitelu on toteutettavissa kyseiseen sovellukseen mitoitettulla automaattisella keskusvoitelujärjestelmällä. Käytettävä voitelurasva valitaan voideltavien kohteiden sekä järjestelmän asettamien vaatimusten mukaan. Automaattivoitelulla voidaan varmistaa, ettei yli- tai alivoitelutilanteita pääse syntymään. Riittävän pienillä kerta-annoksilla sekä tiheillä jälkivoiteluväleillä voidaan taata kriittisten voitelupintojen tuoreen rasvan saanti. Automaattivoitelussa ongelmia voivat aiheuttaa annostelijoiden toimintahäiriöt ja perusöljyn erottuminen saentimesta putkistopaineen alaisuudessa käytettäessä pieniä rasvamääriä ja pitkiä putkituksia. Tapauskohteisesti tulee miettiä, tarvitseeko automaattivoitelu pilkkoa pienempiin erillisiin järjestelmiin, jolloin mahdollisesti välttyään pitkiltä putkituksilta. (Promaint 2010, s. 20)

3.2 Vierintälaakerit

Vierintälaakerit ovat standardoituja, asennusvalmiita koneenosia. Laakerin ulko- ja sisärenkaan välissä olevat vierintäelimet pysyvät tietyllä etäisyydellä toisistaan pitimen avulla (Kivioja et. al. 2007, s.236). Noin 90 % vierintälaakereista on rasvavoideltu ja suuri osa näistä kuuluu jälkivoideltaviin laakereihin (Promaint 2010, s.15). Kuulalaakerissa kuulien ja vierintäratojen välillä vallitsee elliptinen kosketus, kun taas rullalaakereilla kosketuskuvio on rajallisen leveyden omaava viiva (Kivioja et. al. 2007, s.236). Tyypilliset vierintälaakerit on esitetty kuvassa 15.

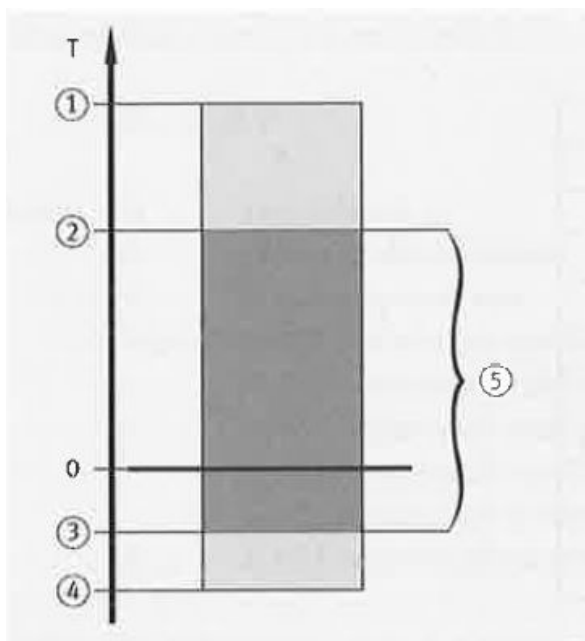


Kuva 15. Vierintälaakerien eri rakennemuodot: 1. urakuulalaakeri, 2. pallomainen kuulalaakeri, 3. viistokuulalaakeri, 4. lieriörullalaakeri, 5. neulalaakeri, 6. pallomainen rullalaakeri, 7. kartiorullalaakeri, 8. painekuulalaakeri, 9. paine-lieriörullalaakeri ja 10. pallomainen painerullalaakeri. Perustuu lähteeseen (Kivioja et. al. 2007, s.236)

Laakeria valittaessa kuormitus on tärkeä tekijä. Yleistettynä rullalaakerit kantavat enemmän kuormaa verrattuna kuulalaakereihin. Lieriörullalaakereita, joissa sisä- tai ulkorengas on laipaton, voidaan kuormittaa vain säteen suuntaisesti. Tavallisia painelaakereita voidaan kuormittaa vain aksiaalisuunnassa. (Kivioja et. al. 2007, s.237)

3.2.1 Lämpötilan vaikutus voitelun toimivuuteen

Rasvan käyttöikään vaikuttaa merkittävästi lämpötila ja suurin osa voiteluvaurioista aiheutuu käyttölämpötilaan soveltumattoman rasvan käytöstä voitelukohteessa. Yleinen harhaluulo on, että rasvoille ilmoitettu käyttölämpötila-alue olisi sama kuin rasvalle sallittu normaali toimintalämpötila-alue. Tuotetiedoissa mainitun käyttölämpötila-alueen ääripäästä ilmaisevat vain lyhytaikaisen käytön korkeimman ja alhaisimman käyttölämpötilan. Jatkuvalle käytölle lämpötila-alue on merkittävästi suppeampi ja eritoten jatkuvan ja lyhytaikaisen käytön ylärajat ovat kaukana toisistaan. (Promaint 2013, s.207) Kuva 16 selventää käytettäviä termejä ja niiden merkityksiä rasvan käyttölämpötila-alueesta.



Kuva 16. Voitelurasvan käyttölämpötila-alueiden rajat. (Promaint 2013, s. 208)

Voiteluainevalmistajilla on tapana ilmoittaa rasvoille käyttölämpötila-alue (1 ja 4), jossa rasvaa voidaan käyttää lyhytaikaisesti. Yläraja lyhytaikaiselle käytölle määräytyy testillä DIN 51821. (Promaint 2013, s.208)

Käyttäjän kannalta tärkeä tieto on jatkuvan käytön yläraja 2, jonka saa valmistajalta kysymällä, mikäli sitä ei ole tuotetiedoissa ilmoitettu. Jatkuvan käytön ylärajan voiteluainevalmistajat saavat selville testaamalla. Jatkuvan käytön lämpötila-alueella 2–3 lämpötilan vaikutus jälkivoiteluväliin voidaan määrittää laskennallisesti. (Promaint 2013, s.208)

Alaraja lyhytaikaiselle käytölle 4 voidaan määrittää virtausvastustestillä DIN 51825. Testi ei itsessään kerro rasvan toimivuudesta kyseisissä olosuhteissa, sillä alhaisissa lämpötiloissa rasvan perusöljyn luovutus voi olla riittämätöntä. Jatkuvan käytön alaraja on rasvalle noin 20 °C lyhytaikaisen käytön alarajaa 4 korkeampi. Esimerkkinä mineraaliöljypohjaisen litiumrasvan käyttölämpötila-alue on -30–140 °C, mutta jatkuvalle käytölle yläraja on vain 70 °C. Käyttölämpötilan ylittäessä noin 15 °C jatkuvan käytön ylärajasta, rasvan käyttöikä puolittuu. Noin 100 °C:n lämpötilassa käyttöikä laskee neljäsosaan siitä, mitä se on alle 70 °C:ssa. Jälkivoitelussa tätä voidaan kompensoida tihentämällä jälkivoiteluväliä. (Promaint 2013, s.208)

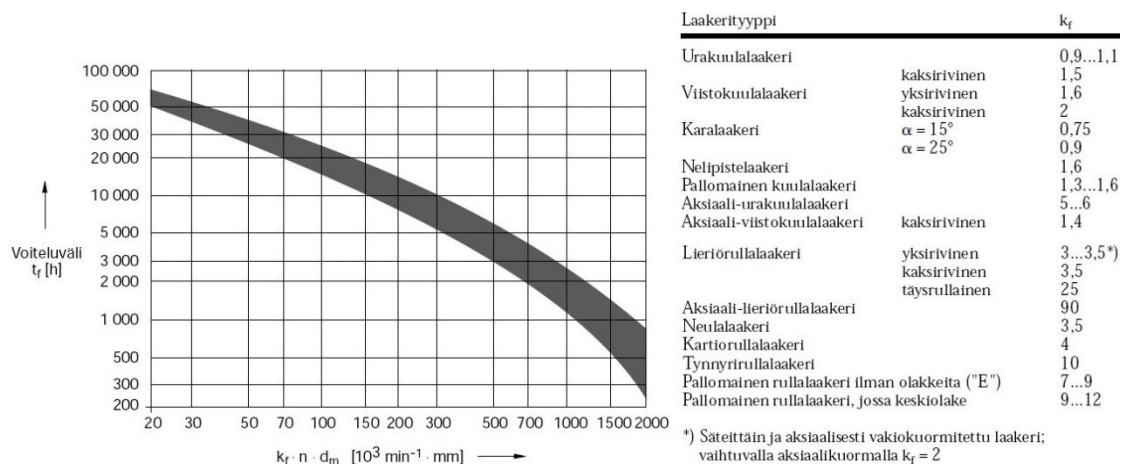
Voitelu saadaan luotettavalle tasolle, kun käytetään rasvaa, jonka jatkuvan käytön yläraja on voitelukohteen käyttölämpötilaa korkeampi. Keskusvoitelujärjestelmän avulla voitelussa voidaan korkeissa lämpötiloissa käyttää myös lyhytkestoisempia ja sitä kautta edullisempia yleirasvoja. Nopeasti pyörivissä voitelukohteissa suurten rasvamäärien läpivienti tuottaa ongelmia, kun laakerin käyntivastus kasvaa. Käytettäessä soveltumattomia rasvoja korkeissa lämpötiloissa voiteluaine voi krakkautua ja aiheuttaa tukoksen voitelujärjestelmään. (Promaint 2013, s.208)

3.2.2 Jälkivoiteluväli

Jälkivoitelu on välttämätöntä, mikäli rasvan käyttöikä on laakerin odotettavissa olevaa elinikää lyhyempi (FAG 1998, s.36). Jälkivoiteluväli saadaan yleensä määritettyä laakerityypin ja pyörimisnopeuden avulla. Erilaiset tekijät käyttöolosuhteissa vaikuttavat kuitenkin merkittävästi jälkivoiteluväliin. Vierintälaakerille tarkka jälkivoitelutarpeen laskennallinen määrittäminen voi olla työlästä vaikuttavien parametrien runsaslukuisuuden ja sitä kautta puutteellisten alkuarvojen vuoksi. Käytettäessä manuaalivoitelua jälkivoiteluvälit joudutaan määrittämään kokemuseräisesti, jotta luotettava käyttövarmuus saavutettaisiin. Indikaattoreina jälkivoiteluväliä arvioitaessa toimivat voitelukohteesta poistuvan rasvan värimuutoksen ja lämpötilan seuranta sekä voitelukalvon paksuutta mittaavien laitteiden käyttö. (Promaint 2010, s.28)

Jos olosuhteet ovat edulliset, voidaan jälkivoiteluväli määrittää käyttämällä kuvan 17 käyrästä ottamalla huomioon laakerille ominainen rasvankulutus, pyörimisnopeus ja laakerin koko (Promaint 2010, s.28). Litiumsaippuapohjaisille vakiorasvoille annetaan voiteluväli t_f . Lähtötietoina voiteluvälin määrittämisessä ovat jäykkyyden luokan 2-3 litiumsaippuaperustainen rasva ja käyntilämpötila maksimissaan 70 °C. Kuormitusta vastaava suhde on $P/C < 0,1$ (FAG 1998, s.35). Epäedullisemmissa olosuhteissa voiteluväliä on lyhennettävä ja se voidaan laskea kaavalla

$$t_{fq} = t_f * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6. \quad (2)$$



Kuva 17. Jälkivoiteluvälin määrittäminen edullisissa ympäristöolosuhteissa. Perustuu lähteeseen (FAG 1998, s.36).

Pienennyskertoimet f_1 – f_6 on esitetty liitteessä A. Huomattavasti jälkivoiteluväliin lyhennävästi vaikuttaa tietyissä tapauksissa laakerin läpi kulkeva ilmavirta. Ilman virratessa laakerin läpi se vanhentaa voiteluainetta, vie mukanaan rasvaa tai öljyä ja tuo lisäksi epäpuhtauksia laakerin sisälle. Rasva, jonka perusöljyllä on korkea viskositeetti ($v_{40} \geq 400 \text{ mm}^2/\text{s}$), luovuttaa erityisesti matalissa lämpötiloissa vähän öljyä saentimesta. Tällaisen rasvan käyttäminen vaatii lyhyttä voiteluväliä. Tiivistimen kautta laakerin sisään

tunkeutuvat epäpuhtaudet (myös vesi) lyhentävät osaltaan rasvan käyttöikää. (FAG 1998,s. 35)

3.2.3 Jälkivoitelumäärä

Vierintälaakerin rasvantarve on pieni, mutta käyttöolosuhteet vaikuttavat voitelutarpeeseen merkittävästi. Laakerin tarvitsema voiteluainemäärä on riippuvainen laakerin koosta ja jälkivoiteluvälistä. Keskusvoitelujärjestelmiä käytettäessä voitelutiheys on manuaalivoiteluun verrattuna paljon tiheämpi ja syötettävät voiteluaineen kerta-annokset voitelukohteeseen paljon pienempiä. Käytettävä voiteluaine ja tarvittavat kertaannosmäärät tulee huomioida keskusvoitelujärjestelmää mitoittaessa. Esimerkiksi rasvasäiliö, pumppu ja jakajien määrä sekä tyypit tulee miettiä etukäteen. Tyypillisesti keskusvoitelujärjestelmissä annostelutiheys on 1–3 kertaa vuorokaudessa. (Promaint 2010, s.30)

Kunnossapitoyhdistys Promaint (2010, s.30) on koonnut eri lähteistä laskukaavan, jonka avulla saadaan laskettua jälkivoiteluun tarvittava rasvamäärä:

$$G = D * B * V, \quad (3)$$

jossa G on rasvamäärä grammoina, D laakerin ulkohalkaisija (mm), B laakerin leveys (mm) ja V on voiteluvälistä tai voiteluaineen syöttötyylistä riippuva termi. Jos tarvittava rasvamäärä halutaan muuttaa yksikköön cm³, tarvitsee kaavasta 3 saatu tulos jakaa arvolla 0,9, koska voitelurasvan tyypillinen tiheys on 0,9 g/cm³ (Neste 2013, s. 31; Shell 2015, s. 8). Taulukossa 4 on esitetty V:n arvoja eri voiteluväleille.

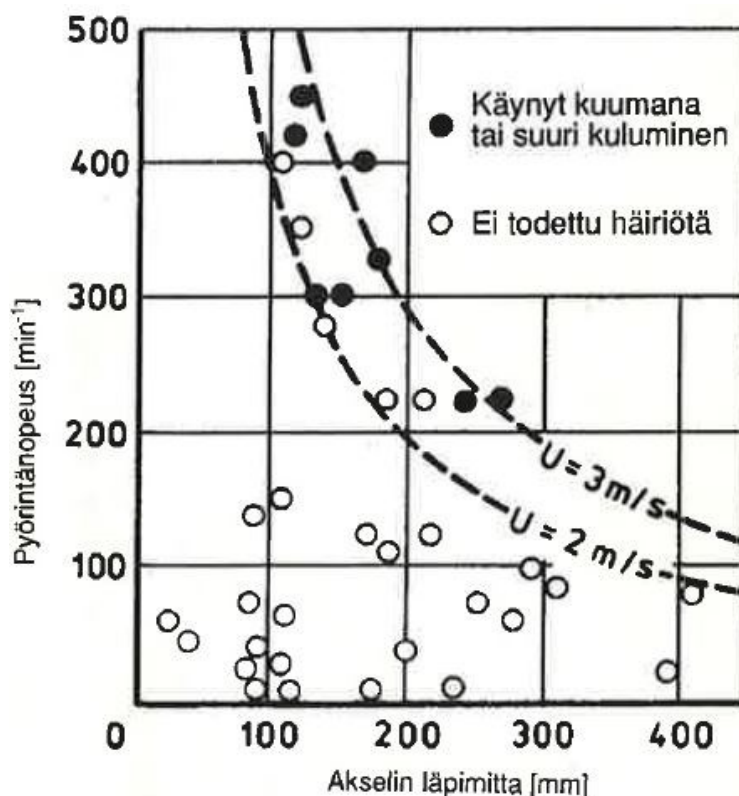
Taulukko 4. Jälkivoitelumäärän laskemiseen tarvittavan V-termin arvot eri voiteluväleille. (Promaint 2010, s.30)

Suosittava taho	V	Jälkivoiteluväli
FAG	0,001	Vuorokausi
	0,002	Viikko
	0,003	Kuukausi
	0,004	Vuosi
	0,005	2 vuotta
SKF	0,002	Laakerin sivulta sisään tapahtuvassa voitelussa, riippumatta voiteluvälistä
	0,005	Laakerin keskeltä sisään tapahtuvassa voitelussa, riippumatta voiteluvälistä

Keskusvoitelujärjestelmää käytettäessä rasvan annostelutiheyttä sekä annosmääriä voidaan säätää joustavasti voitelukohteen tarpeen ja koneen käyntitiedon mukaan. Manuaalivoitelussa voitelu tapahtuu tyypillisesti viikon, kuukauden tai jopa vuoden välein joltuen mm. henkilöstöresursseista. Rasvan vaihtuvuuden maksimoimiseksi jälkivoitelu suoritetaan koneen käydessä. (Promaint 2010, s.30)

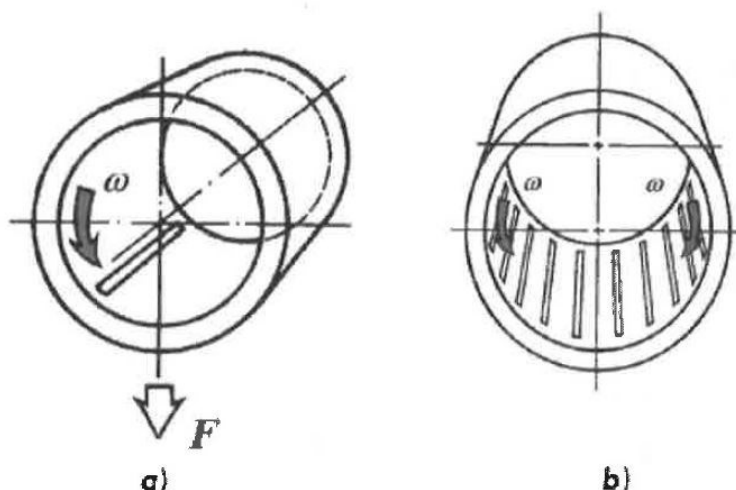
3.3 Liukulaakerit

Hydrodynaamisen voiteluteorian soveltaminen rasvavoiteluun onnistuu vain rajoitetusti. Rasva ei kuljeta pois lämpöä voitelukohteesta, joten se sopii voiteluaineeksi vain vähän lämpöä kehittäviin laakereihin. Rajanopeutena rasvavoidellulle liukulaakerille pidetään 2 m/s. (Promaint 2010, s.31) Kuvasta 18 nähdään kokemuseräisesti saaduilla raja-arvoilla luotu käyttöalue rasvavoidellulle liukulaakerille.



Kuva 18. Kokemuseräisesti saadut suurimmat sallitut liukunopeudet rasvavoidellulle liukulaakerille. (Kara 1989, s.119)

Sekavoitelu asettaa liukulaakerin materiaalille kovemmat vaatimukset kuin hydrodynaaminen voitelu. Myös voitelu-urien sijoittelussa on eroja. Hydrodynaamisessa voitelussa syöttötaskut voiteluaineelle sijoitetaan tyypillisesti laakerin jakotasoon tai vastakkaiselle puolelle kuormitusta. Rasvavoitelussa taas voiteluaine tulee syöttää lähelle kuormitusaluetta, josta vastinpinta siirtää sen kuormitusalueelle. Akselin pyörimissuunnan vaihdellessa voitelu-uria tulee sijoittaa koko kuormitusalueelle. Kuva 19 esittää voitelu-urien sijoitustavat eri sovelluksissa. (Promaint 2010, s.31)



Kuva 19. Voitelu-urien sijoittelu akselin pyöriessä yhteen suuntaan (a), akselin pyöriessä molempiin suuntiin (b). (Promaint 2010, s.32)

Liukulaakeriin syötetty rasvamäärä riippuu useammasta tekijästä, kuten laakerin vapaasta tilasta, kuormitustyyppistä, rasvan virtausominaisuuksista ja vallitsevista ympäristötekijöistä. Nämä tekijät voivat edellyttää suurempia rasvamääriä. Rasvan täytyy vaihtua voitelukohteessa tietyin jälkivoiteluvälein ja -määrin. (Exxon Mobil Corporation 2012)

Rasvausmenetelmät liukulaakereilla, tapeilla ja heloilla eivät ole niin tarkasti määriteltäviä, eivätkä niin kriittisiä kuin vierintälaakereilla. Tämä johtuu siitä, ettei rasva joudu liukulaakereissa samanlaiseen rasitukseen, jonka vierintäelimet aiheuttavat rasvalle vierintälaakerissa. Scottin (2005) mukaan liukulaakereille syötettävät rasvamäärät ja sopivat voiteluvälit löytyvät sovelluskohtaisesti yrityksen ja erehdyksen kautta, ja yleisesti ottaen liukulaakeria ei voi ylivoiella.

Voiteluväliin vaikuttavat eniten karut olosuhteet, iskumaiset kuormitukset ja erityisesti käyttölämpötila. Liukulaakerit ovat tavallisesti rakenteeltaan yksinkertaisempia ja siten helpompia voidella kuin vierintälaakerit. Käyttöolosuhteisiin sopiva viskositeetti sekä puhdas ja kuiva voiteluaine riittävät muodostamaan tarvittavan voiteluainekalvon. (Scott 2005)

3.4 Liukupinnat

Liukupintoja voidellessa rasvan on kyettävä pitämään liukupinnat erillä toisistaan riittävän tehokkaasti. Rasva ei saa estää liukupintojen tarkoituksenmukaista toimintaa, eikä tarpeettomasti vastustaa liukupintojen liikettä tai aiheuttaa esimerkiksi mittapoikkeamia. Myös nykiminen tarkasti toimivissa liukupintamekanismeissa tulee estää. (Promaint 2010, s.33)

Rasvan tulee suojata liukupintoja ulkoiselta lialta ja epäpuhtauksilta. Rasvan täytyy olla tarpeeksi jäykkää, jotta se pysyy hyvin voideltavilla liukupinnoilla ja välttyään liiallisen rasvan käytöltä, mikä aiheuttaa ongelmia. (Promaint 2010, s.33)

3.5 Nivelakselit

Nivelakseleissa voideltaviin osiin kuuluvat liukuvat akseliholkit ja nivelien laakeroinnit. Laakeroinneissa tapahtuu käytön aikana pientä edestakaista liikettä. Liikkeen vaihtelunopeus on riippuvainen nivelakselin pyörimisnopeudesta ja liikkeen suuruus akselin mitoituksesta ja linjauksesta. Kuormitukset nivelien laakeroinneissa voivat olla kohtuullisen suuria. (Promaint 2010, s.33)

Käytettävä rasva on valittava olosuhteisiin sopivaksi, jotta se pysyy suunnitellulla pyörimisnopeudella kuormituksen alaisella kosketusalueella. Myös rasvan mekaaninen kestävyys on varmistettava tärinälle alttiissa kohteessa. (Promaint 2010, s.33)

4. NYKYINEN VOITELUJÄRJESTELMÄ

Kalmarin konttilukeissa käytetään rasvavoiteluun automaattista voitelujärjestelmää, jonka avulla rasva saadaan pumpattua voitelukohteille oikean kokoisina annoksina riittävän usein. Tällä varmistetaan tuoreen rasvan saanti voitelukohteille.

Työssä tarkastelun kohteena olevan Kalmar ESC350 -lukin voitelujärjestelmä on malliltaan Lincoln P215. Kalmar käyttää kyseistä järjestelmää monilinjaisena progressiivisena järjestelmänä. Runkolinjoja on yhteensä kolme ja jakajat ovat perinteisiä progressiivisia jakajia. Monilinjaisten järjestelmien käyttö on perusteltua laajoissa järjestelmissä, joissa voitelukohteiden rasvamäärät eroavat toisistaan. Tällöin myös järjestelmän säätäminen on helpompaa, kun se voidaan tehdä linjakohtaisesti.

Tarttujan mallista riippuen voitelupisteiden lukumäärä vaihtelee. Voitelupisteitä konttilukissa on yhteensä 94, kun tarttuja on single-mallinen. Jos kone on varustettu twin-tarttujalla, voitelupisteitä on 100 kappaletta. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan järjestelmää, jossa on 94 voitelupistettä ja varsinaisia voitelukohteita yhteensä 32 kappaletta.

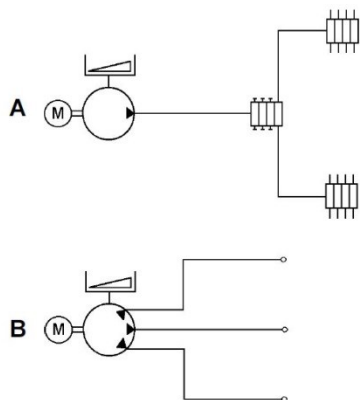
4.1 Lincoln P215

Lincolnin P215-pumppumalli on tarkoitettu käytettäväksi keskusvoitelujärjestelmissä voiteluaineiden annosteluun. Monilinjaiseen pumppumalliin on mahdollista asentaa jopa 15 pumppuelementtiä, jolloin ulostulojen maksimimäärä on 15. Kuvassa 20 on esitetty P215-pumppu.



Kuva 20. Lincoln P215 -keskusvoitelupumppu. (Lincoln 1996, s.1)

Pumpun maksimi käyttöpaine (350 bar) mahdollistaa käytön monilinjaisessa järjestelmässä joko suorana lähteenä voitelukohteille tai vaihtoehtoisesti keskusvoitelupumppuna laajoissa progressiivisissa järjestelmissä. (Lincoln 1996, s.6) Kuvasta 21 nähdään pumpun eri käyttötavat.



Kuva 21. P215-pumpun eri käyttösovellukset keskusvoitelujärjestelmässä. (Lincoln 1996, s.6)

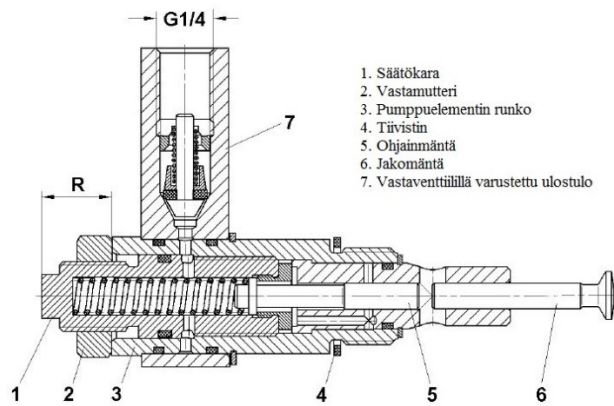
Kuvan 18 A-tapauksessa pumppua käytetään keskusvoitelupumppuna laajassa progressiivisessa järjestelmässä, kun taas B-tapauksessa jokainen pumppuelementti syöttää rasvan suoraan yhdelle voitelukohteelle. Tarkasteltavassa konttilukissa pumppua käytetään A- ja B-tapauksen yhdistelmänä, jossa on kolme pumppuelementtiä ja useita progressiivisia jakajia. (Lincoln 1996, s.5)

Pumppua on saatavilla usealla eri sähkömoottorivaihtoehdolla, vaihdevälityksellä ja voiteluainesäiliöllä. Kalmarin käyttämässä järjestelmässä on 24 voltin sähkömoottori, jonka perässä on vaihdelaatikko välityksellä 100:1. Voiteluainesäiliön koko on 30 litraa. (Lincoln 1996, s.5) Edellä mainittua sähkömoottorivaihtoehtoa ei ole vakiona saatavilla, vaan se on erikseen Kalmarin järjestelmään valittu.

4.1.1 Pumppuelementti

Pumppumalliin P215 on mahdollista asentaa 1–15 pumppuelementtiä, jotka pumppaavat voiteluainetta järjestelmään. Tarkasteltavassa järjestelmässä voiteluaineena käytetään rasvaa, ja elementtejä on yhteensä kolme. Pumppuelementit ovat säädettäviä, joten niiden syöttämät rasvamäärät saadaan voitelukohteittain sopiviksi.

Elementtejä on saatavissa kahta eri kokoa, joissa männän halkaisija on 6 mm tai 7 mm. Männän koosta riippuen elementin syöttämä voiteluainemäärä on iskua kohden maksimissaan joko 0,16 cm³ tai 0,23 cm³. Kalmarin järjestelmässä männän halkaisija on 7 mm. (Lincoln 1996, s.7) Kuvassa 22 on esitetty pumppuelementin läpileikkaus.



Kuva 22. Pumppuelementin läpileikkaus. Perustuu lähteeseen (Lincoln 1996, s.10)

Pumppuelementin säätö tapahtuu löysäämällä ensin vastamutteria 2 (kuva 22), ja sen jälkeen säätökaraa väännetään jakoavaimella joko vastapäivään tai myötäpäivään. Säätökaraa väännetään

- myötäpäivään, mikäli pumppuelementin tuottoa halutaan **pienentää**, ja
- vastapäivään, mikäli pumppuelementin tuottoa halutaan **suurentaa**.

Säädön jälkeen tulee vastamutteri kiristää takaisin. Kuvassa 22 näkyvä mitta R määrittää elementin tuoton. (Lincoln 1996, s.10) Taulukkoon 5 on koottu mitta-arvot R:lle ja sitä vastaavat osuudet elementin maksimituotosta.

Taulukko 5. Pumppuelementin tuotto iskua kohden eri R:n arvoilla. (Lincoln 1996, s.10)

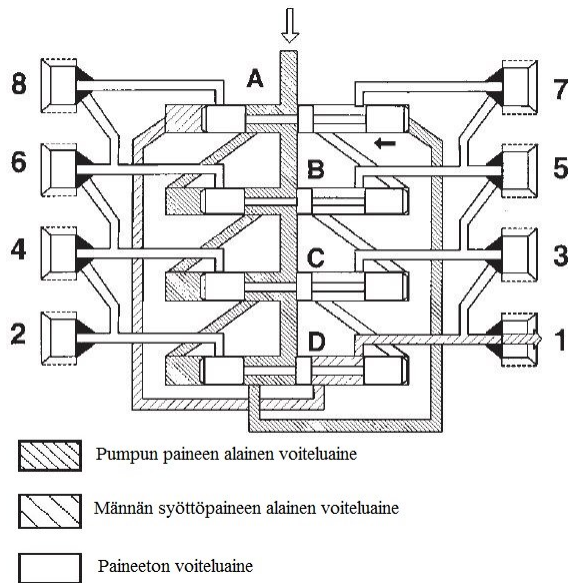
R (mm)	Pumpun tuotto (maksimista)
22,5	100 %
21,0	75 %
19,5	50 %
18,0	25 %

4.1.2 Jakajat

Lincolnin SSV-jakajat ovat progressiivisia mäntätoimisia annostelijoita, jotka annostelevat voiteluainetta voitelukohteille ennalta määrätyn tilavuuden ulostuloa kohden. Jakajia on saatavilla 6 ulostulosta 22 ulostuloon asti. Ulostulon tulppaamalla voiteluaine syötetään aina seuraavana vuorossa olevaan ulostuloon. Yhdistelemällä ulostuloja saadaan aikaan lukuisia eri mahdollisuuksia voiteluainemäärille. (SKF 2015b, s. 39)

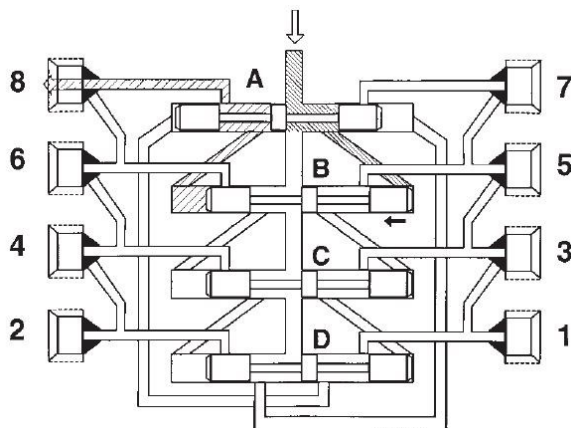
Jakajia voidaan käyttää voiteluöljyn tai -rasvan annosteluun. Rasvan jäykkyyssluokka voi olla enintään NLGI 2 ja voiteluöljyn viskositeetin vähintään 40 mm²/s. Jakaja syöttaa voiteluainetta 0,2 cm³ ulostuloa ja männän iskua kohden. (Lincoln 2006, s.22)

Voiteluaineen kulkeutuminen jakajassa on esitelty kuvissa 23–27. Kuvassa 23 on esitetty myös merkintätavat voiteluaineelle eri paineissa. Merkinnät pätevät myös kuvissa 24–27.



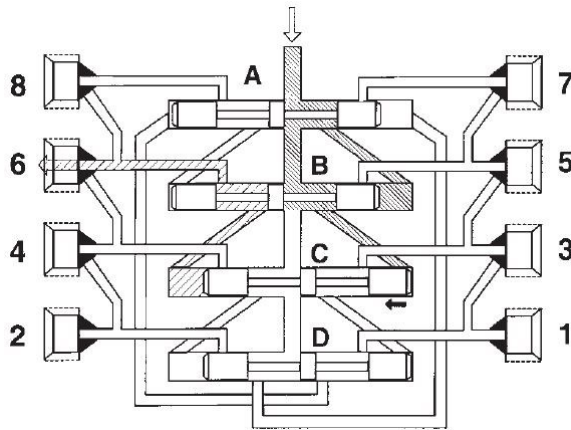
Kuva 23. Jakajan toiminta, vaihe 1. Perustuu lähteeseen (Lincoln 2006, s.23)

Voiteluaine tulee jakajaan sisälle ylhäältä kuvan 23 osoittamasta valkoisen nuolen suunnasta. Jakajan sisällä voiteluaine kulkeutuu sen läpi ja takaisin ylös männän A oikeanpuoleiseen päähän. Mäntä A liikkuu mustan nuolen osoittamaan suuntaan (kuva 23) voiteluaineen paineen vaikutuksesta ja tällöin mäntä työntää linjassa olevan voiteluaineen ulostuloon 1.



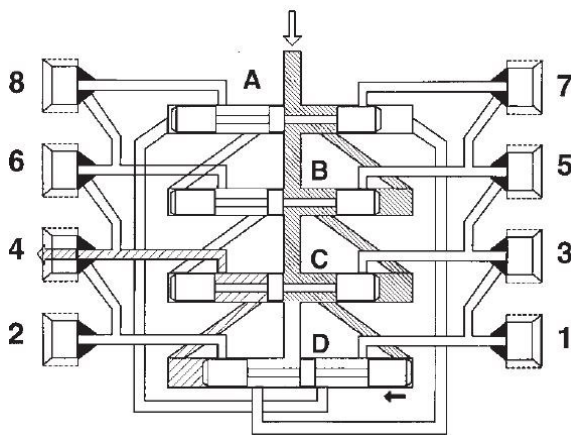
Kuva 24. Jakajan toiminta, vaihe 2. (Lincoln 2006, s.23)

Kun mäntä A on liikkunut vasempaan päättyyn asti, avautuu yhdyskanava B-männän oikeaan päähän (kuva 24). Valkoisen nuolen suunnasta tuleva voiteluaine liikuttaa mäntä B vasemmalle työntäen samalla männän vasemman päädyn puoleisen rasvan ulostuloon 8.



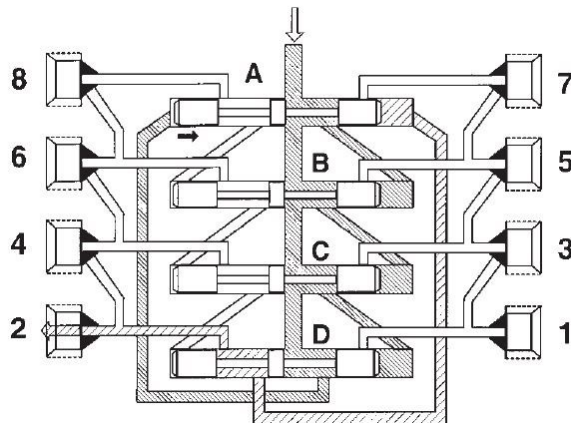
Kuva 25. Jakajan toiminta, vaihe 3. (Lincoln 2006, s.24)

Jälleen männän B siirtyessä vasempaan reunaan, avautuu yhdyskanava männän C oikeaan pätyyn (kuva 25) ja pumpun paineistama voiteluaine pääsee liikuttamaan mäntää C vasemmalle työntäen samalla vasemman päädyn edessä olevan rasvan voitelukohteen ulostulon 6 kautta.



Kuva 26. Jakajan toiminta, vaihe 4. (Lincoln 2006, s.24)

Yhdyskanavan avautuessa voiteluaine työntää mäntää D kohti vasenta päätyä (kuva 26). Mäntä D työntää sen vasemman päädyn takana olevan voiteluaineen ulostuloon 4.



Kuva 27. Jakajan toiminta, vaihe 5. (Lincoln 2006, s.24)

Vaiheen 4 lopuksi, kun mäntä D on liikkunut täysin vasempaan päättyyn, avautuu yhdyskanava männän A vasempaan päättyyn. Vaiheessa 5 (kuva 27) paineistettu voiteluaine kulkee jakajan läpi alas yhdyskanavaan ja sitä kautta männän A vasempaan päättyyn liikuttaen sitä oikealle. Tällöin männän A oikean päädyn puoleinen rasva työntyy voitelukohteelle ulostulon 2 kautta.

Seuraavissa vaiheissa männät B–D siirtyvät myös takaisin oikeaan reunaan, jolloin voiteluainetta syötetään ulostuloihin 7, 5 ja 3. Tämän jälkeen alkaa jälleen uusi kierros. Jakaja syöttää voiteluainetta niin kauan, kuin linjaan pumpataan uutta rasvaa. Kun pumppu pysähtyy, myös jakaja lopettaa toimintansa siihen vaiheeseen, missä se oli. Rasvapumpun käynnistyessä uudelleen järjestelmä jatkaa toimintaansa syöttämällä rasvaa seuraavana vuorossa olevaan kohteeseen.

4.1.3 Pumppaus- ja taukoajan säätö

Rasvavoitelujärjestelmän pumppua ohjaa tarkasteltavassa konttilukissa lukin oma PLC-järjestelmä. Pumppausaika on määritetty vakioksi 25 minuuttiin, jotta kaikki voitelukohteet ehtivät saada ainakin yhden annoksen voitelurasvaa (Kalmar 2016b, s.251)

Tauko aika koneen luovutuksen yhteydessä on 265 minuuttia, joka nostetaan ensimmäisessä huollossa 350 minuuttiin. Taukoajan säätö onnistuu PLC:ltä käsin, ja se voidaan asettaa 350–700 minuutin välille. Pumppausaika ei ole säädettävissä. (Kalmar 2016b, s.251)

4.2 Konttilukin voitelukohteet

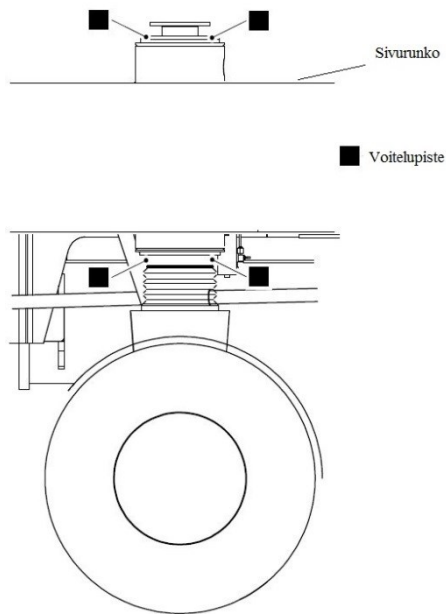
Liitteessä B on esitetty nykyisen järjestelmän keskusvoitelukaavio. Konttilukin voitelukohteet sijaitsevat molemmissa sivurungoissa sekä tarttujassa. Sivurungoissa voitelukohteet liittyvät ohjaukseen ja tarttujan kautta voidellaan tarttujan komponenttien lisäksi myös pilareiden liukujohteita ja nostopalkin osia.

Keskusvoitelu on jaettu kolmeen erilliseen linjaan, koska voitelukohteet sijaitsevat suhteellisen kaukana toisistaan eri puolilla konetta. Tällä jaolla saavutetaan myös parempi luotettavuus, kun yhden voitelulinjan tukkeutuessa koko järjestelmä ei lakkaa toimimasta.

Tässä työssä tarkasteltavassa Kalmar ESC350-konttilukin keskusvoitelun piirissä on yhteensä 32 voitelukohdetta. Yksinkertaistamisen vuoksi työssä otetaan huomioon kuitenkin vain yksittäiset ja erilaiset voitelukohteet, joita on lukumäärällisesti 12 kappaletta.

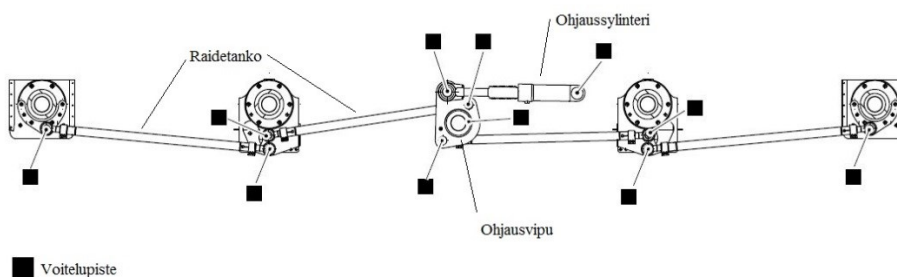
4.2.1 Ohjaus

Molempien sivurunkojen voitelukohteet ovat identtiset ja ne liittyvät ohjauksen osien voiteluun. Ohjausvarsia on yhteensä neljä kappaletta molemmissa sivurungoissa ja voitelu on jaettu erikseen etu- ja takapään ohjausvarsille, kuten keskusvoitelukaaviosta (liite B) nähdään. Ohjausvarsien ylä- ja alalaakerit kuuluvat keskusvoitelun piiriin. Kyseessä ovat isot liukulaakerit, joihin rasva syötetään kahdesta eri pisteestä jokaisen laakerin sivusta. Kuvassa 28 on havainnollistettu ohjausvarsien laakereiden voitelupisteet. Yläpään laakerin sisähalkaisija on 211 mm ja leveys 83 mm (Kalmar 2000). Alapään laakerin vastaavat mitat ovat 270 mm ja 102 mm (Kalmar 2012a)



Kuva 28. Ohjausvarren laakereiden voitelupisteet. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.157)

Ohjauslaitteiden voitelukohteisiin kuuluvat raidetankojen nivelpäiden ja ohjaussylinterien nivellaakerien lisäksi ohjausvivun vierintälaakerit. Molemmissa sivurungoissa on kaksi vierintälaakeria ja 10 nivellaakeria. Kuvasta 29 nähdään ohjauslaitteen voitelupisteiden sijainnit.

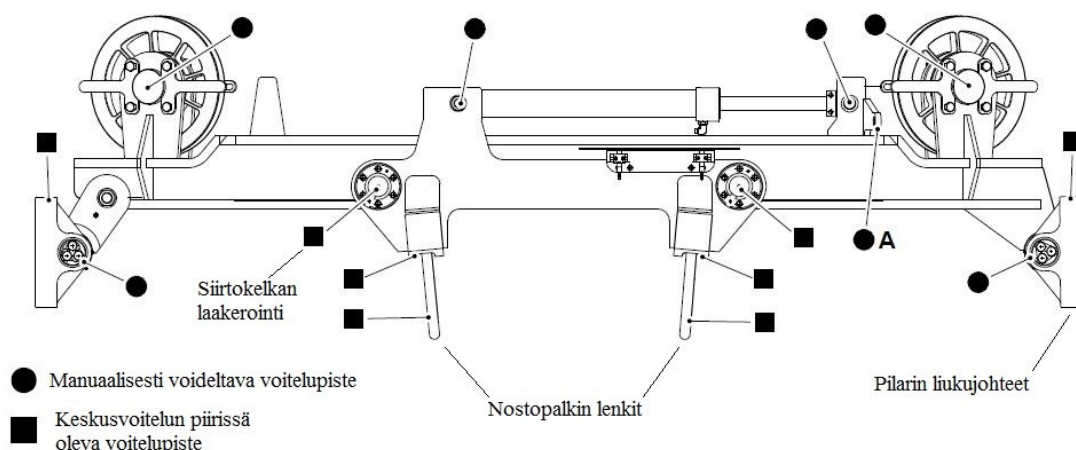


Kuva 29. Ohjauslaitteiden laakereiden voitelupisteet. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.152)

Raidetangon päissä olevat nivelpäät ovat sisähalkaisijaltaan 50 mm ja leveydeltään 35 mm (Kalmar 2014b). Ohjaussylinterin nivellaakerien sisähalkaisija on 79 mm ja leveys 49 mm (Kalmar 2012b). Ohjausvivun vierintälaakeri on ulkohalkaisijaltaan 215 mm ja leveydeltään 58 mm (Kalmar 2013).

4.2.2 Nostopalkki

Nostopalkin kautta voitelulinja menee tarttujalle ja samalla voidellaan siirtokelkan vierintälaakereita, nostopalkin lenkkejä sekä pilareiden liukujohteita. Nostopalkkeja on kaksi, toinen koneen etupäässä ja toinen takapäässä. Siirtokelkalla voidaan liikuttaa tarttujaa sivusuunnassa. Siirtokelkaa kohden vierintälaakereita on 4 kappaletta ja ne ovat kaikki samanlaisia neulalaakereita. Nostopalkissa lenkkejä on 2 kappaletta ja niistä voidellaan lenkin ylä- ja alapään läpi menevien akselien ja lenkkien kontaktipintaa. Nostopalkin liikkeessä pystysuunnassa pilareiden välissä pienennetään liukukitkaa syöttämällä rasvaa nostopalkin liukujohteiden ja pilareiden väliin. Kuvasta 30 nähdään nostopalkin voitelupisteiden sijainnit. Siirtokelkan vierintälaakerin ulkohalkaisija on 68 mm ja leveys 30 mm. Liuku- ja kontaktipintojen pinta-aloilla tai muilla mitoilla ei tässä yhteydessä ole merkitystä. (Kalmar 2014a)

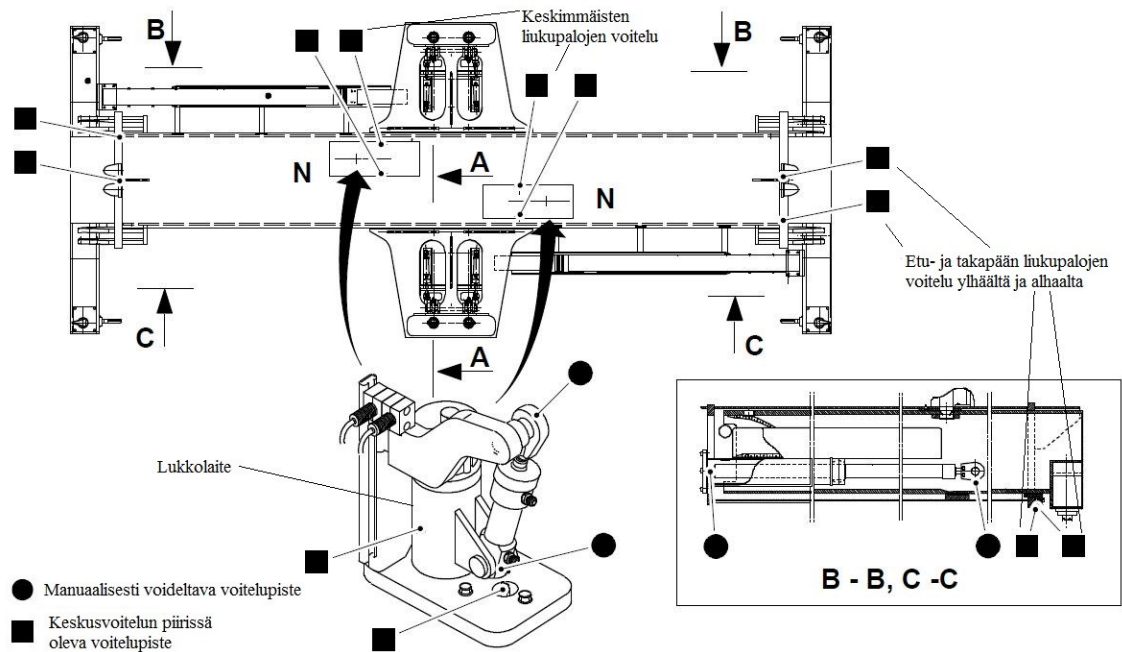


Kuva 30. Nostopalkin voitelupisteiden sijainnit. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.207)

4.2.3 Tarttuja

Tarttujassa keskusvoitelu syöttää rasvaa kaksille eri liukupaloille, jotka sijaitsevat tarttujan ylä- ja alapuolella. Tällöin tarttujan pituussuuntainen liike saadaan sulavammaksi. Myös t-palkin tiettyyn pituuteen lukitsevaa lukkolaitetta voidellaan keskusvoitelujärjestelmällä. Lukkolaitteessa voidellaan jousijännitteisen lukitusjärjestelmän lisäksi lukkolaitteen pohjan läpi t-palkin yläpintaa, jotta kitka pienenesi lukitustapin ja t-palkin yläpinnan välillä ennen tapin osumista lukitusreikään. T-palkin päällä keskellä sijaitsee neljä liukupalaa, joita voidellaan myös keskusvoitelujärjestelmän avulla. Nämä keski-

liukupalat ovat toiminnassa, kun tarttujassa ei ole konttia kiinni. Tarttujan voitelupisteet nähdään kuvasta 31.



Kuva 31. Tarttujan voitelupisteiden sijainnit. Perustuu lähteeseen (Kalmar 2016b, s.236)

4.3 Nykyisen järjestelmän suorituskyky

Jotta lukin nykyistä voitelujärjestelmää voitaisiin kehittää, selvitettiin ensimmäiseksi järjestelmän suorituskykyarvot ja sitä kautta voitelukohteille syötetyt rasvamäärät. Kalmarin käyttämä sähkömoottori pyörii vakionopeudella $1500 \frac{1}{min}$. Kierukkavaihte alentaa pumppuyksikön pumppausnopeudeksi 15 iskua minuutissa.

Kalmarin (2007) pumppuelementin asennus- ja säätöohjeiden mukaan sivurunkojen pumppuelementtien mitta R (kuva 22) asetetaan mittaan 19,0 mm ja tarttujan samainen mitta R 22,5 mm:iin. Tällöin sivurungoille syötetään 50 % maksimituotosta ja tarttujalle 100 %. Sivurunkojen pumppuelementtien tuotoksi voidaan laskea tilavuusvirta

$$Q = V_p * n, \quad (4)$$

jossa V_p on pumppuelementin tuotto iskua kohden ja n iskujen määrä minuutissa, joka tässä tapauksessa on 15/min. Taulukkoon 6 on laskettu pumppuelementtien tuotot eri ajanjaksoilla tarkasteltuna.

Taulukko 6. *Pumppuelementtien tuotot eri ajanjaksoilla tarkasteltuna.*

Pumppuelementin syöttökohde	Säätö	Tuotto V [cm ³ /isku]	Tuotto minuutissa [cm ³ /min]	Tuotto vuorokaudessa [cm ³ /24h]
Sivurunko vasen	50 %	0,115	1,725	172,50
Sivurunko oikea	50 %	0,115	1,725	172,50
Tarttuja	100 %	0,230	3,450	345,00

Pumppausajan ollessa 25 minuuttia ja taukoajan 350 minuuttia, rasvavoitelujärjestelmä ehtii pumppaamaan 24 tunnissa neljä jaksoa, mikä kokonaisuutena tarkoittaa yhtä vuorokautta. Rasvamääriä tarkastellessa ajanjaksona käytetään 24 tuntia. Tämä sen vuoksi, että vuorokaudessa syötetty rasvamäärä on helpompi hahmottaa kuin tunnissa tai viikossa syötetty määrä. Tämän lisäksi rasvamäärien säätäminen on helpompaa, koska esimerkiksi kaavaa 3 käytettäessä jälkivoiteluvälinä on yksi vuorokausi.

4.3.1 Syötettyjen rasvamäärien tarkastelu

Alkuperäisillä asetuksilla syötettyjen rasvamäärien tarkastelu tehtiin Kalmarin valmiilla Excel-pohjaisella mallilla (liite C), joka simuloi voitelupistekohtaisesti syötettyä rasvamäärää tietyssä ajassa. Pohjalle tarvitsee syöttää lähtötietoina aikajaksossa syötetty rasvamäärä voitelulinjaa kohden. Tämän jälkeen pohja jakaa rasvamäärät voitelukohteille samoin kuin oikeat jakajat. Näin saadaan selvitettyä syötetyt rasvamäärät voitelupistekohtaisesti. Tässä hyödynnettiin taulukon 6 viimeistä saraketta, eli vuorokauden aikana syötettyä rasvamäärää. Taulukkoon 7 on koottu konttilukin eri voitelukohteille syötetyt rasvamäärät vuorokautta kohden, laakerikohteiden paksuus ja leveys sekä laskettu teoreettinen rasvantarve vierintälaakereille kaavan 3 mukaisesti. Voiteluvälinä laskuissa on ollut yksi vuorokausi ja saadut arvot on muutettu yksikköön cm³.

Taulukko 7. *Voitelukohteille syötetyt rasvamäärät 24 tunnissa.*

Kohde	Syöttö tällä hetkellä [cm ³ /24h]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	Rasvan tarve [cm ³ /päivä]
Lenkki	2,40			
Lukkolaite	9,58			
Ohjaussylinteri nivellaakeri	1,80	70	49	
Ohjausvarren liukulaakeri	21,56	295	102	
Ohjausvivun vierintälaakeri	3,59	215	58	13,86
Pilarin liukujohde	21,56			
Raidetangon pään nivellaakeri	1,80	50	35	
Siirtokelkan vierintälaakeri	4,79	68	30	2,27
T-palkin keskiliukupalat	4,79			
T-palkin liukupala, alapää	28,75			
T-palkin liukupalat, yläpää	14,38			

Kuten taulukosta 7 nähdään, suurimmat voitelumäärät menevät ohjausvarren liukulaakerille, pilarin liukujohteille sekä tarttujan t-palkin päädyn alapuoliselle liukupalalle. Varsinkin ohjausvarren liukulaakerille syötetty rasvamäärä vaikuttaa hyvin suurelta, vaikka otetaan huomioon laakerin suuri koko. Toinen huomionarvoinen asia on vierintälaakerikohteiden voitelu. Ohjausvivun suurikokoiselle vierintälaakerille syötetty voiteluainemäärä on vain noin neljäsosa teoreettisesta rasvatarpeesta. Toisaalta siirtokelkan vierintälaakeri saa yli kaksinkertaisen määrän rasvaa teoreettiseen määrään verrattuna. Kuvasta 32 nähdään nykyisen järjestelmän eräitä ongelmakohtia, joissa syötetyt rasvamäärät ovat selkeästi liian suuria. Kuvassa esiintyvät voitelukohteet eivät ole kaikki samasta koneesta, mutta tuovat selkeästi ilmi ylivoitelun visuaalisen ongelman.



Kuva 32. Ongelmakohtia nykyisessä järjestelmässä.

Kuvan 32 vasemmassa yläkulmassa on raidetangon pään voitelukohde, eli nivellaakeri. Rasvaa on jo jonkin verran kerääntynyt nivellaakerin alapuolelle ja tippunut myös lokasuojalle. Nivellaakerin tapauksessa varsinainen ylivoitelu ei ole haitallista, mutta ei tarkoituksen mukaistakaan. Kuvan oikeassa yläkulmassa näkyy pilarin liukujohde. Rasva on myös tässä kohteessa päässyt hiukan kerrostumaan ja kasautumaan, mikä on merkki liian suuresta syöttömäärästä. Ajan myötä rasva valuu pilaria pitkin alas maahan mahdollisesti saastuttaen ympäristöä. Vasemmassa alareunassa on tarttujan päädyn ylä- ja alapuoliset liukupalat. Rasvaa on poistunut liukupalojen väleistä runsaasti, jolloin voidaan todeta voitelun olevan liian suurta. Oikeassa alakulmassa näkyvän ohjausvarren alapään laakerin voitelu on runsasta taulukon 7 mukaan, ja kuvan tilanne vahvistaa tä-

män. Rasva on tunkeutunut pois liukulaakerista sekä kumisen palkeen ohi. Kuvien ja taulukon arvojen perusteella voidaan todeta, että syötettyjä rasvamääriä tulisi vähentää.

4.3.2 Kytcentöjen merkitys voitelun toimintaan

Konttilukin voitelujärjestelmän suorituskykyyn vaikuttavat pumppuelementtien säätöjen ja jakajien määrän tai mallin lisäksi myös merkittävästi voitelulinjojen kytkenät. Jotta ennalta määrätty rasvamäärät voidaan syöttää halutuille voitelukohteille, tämä edellyttää letkujen ja putkistojen kytkemistä ohjeiden mukaisesti pumpun ja jakajien välillä.

Voitelujärjestelmää koskevissa asennuskuvissa letkutukset ja putkistojen vedot on merkitty selkeästi jakajien välillä. Virheitä voi kuitenkin sattua, jos tarkkaavaisuus asennustilanteessa herpaantuu tai jos kokoonpano-ohjeissa ei tarpeeksi painoteta sitä, että kytkenät on suoritettava tismalleen asennuskuvien mukaisesti. Muuten voitelukohteissa voi syntyä merkittäviä yli- tai alivoitelutilanteita.

Kytcentöjen merkitystä voitelun suorituskykyyn voidaan havainnollistaa seuraavalla esimerkillä. Jos kytcentävirhe tehtäisiin jo pumppuyksiköillä ja toinen sivurungosta saisikin tarttujalle tarkoitetun rasvamäärän vuorokaudessa, olisi syöttö sivurungolle kokonaisuudessaan kaksinkertainen tarkoitettuun nähden. Tällöin esimerkiksi ohjausvarren liukulaakerille syötetty rasvamäärä olisi $43,12 \text{ cm}^3$ ja raidetangon pään nivellaakerille $3,6 \text{ cm}^3$ vuorokaudessa. Syötettyjen rasvamäärien kaksinkertaistuminen näkyisi rasvan runsaana poistumisena voitelukohteista suuren ylivoitelun vuoksi. Tässä tapauksessa ylivoitelu ei ole kovin kriittistä hitaasti liikkuvien kone-elementtien vuoksi, mutta toisaalta se ei ole hyväksikään rasvan tippuessa koneen osia pitkin lopulta maahan asti. Tämän vuoksi tulee varmistua siitä, että asennuskuvat ja -ohjeet ovat ajan tasalla sekä henkilökunta tietoinen kytcentöjen merkityksestä voitelun toimintaan.

5. NYKYISEN JÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN

Kuten lähtötietojenkin mukaan oli tiedossa, nykyisen järjestelmän ongelmana on ylivoitelu ja syvempi järjestelmän tarkastelu vahvistaa tiedon oikeaksi. Konttilukin voitelukohteet huomioiden lievä ylivoitelu ei ole haitallista, mutta ei toisaalta tuo mitään lisähyötyä koneen toiminnalle. Ennemmin ylivoiteleva kone horjuttaa Kalmarin imagoa laadukkaiden lastinkäsittelylaitteiden toimittajana ja luo ristiriidan ympäristöasioiden hoitamisesta tunnollisesti.

Keskusvoitelun piirissä olevat liuku- ja vierintälaakerit ovat kaikki isoja ja hitaasti pyöriviä laakereita, jolloin lämpötilan kasvu ei tule rajoittavaksi tekijäksi. Myös nivellaakerit kaipaavat rasvaa lähinnä tiivistyksen ja korroosioneston vuoksi. Liukupalat ja -pinnat tarvitsevat rasvaa edellä mainittujen syiden lisäksi varsinaisen voitelun vuoksi, jotta vastakkain liikkuvat pinnat pysyisivät rasvan avulla toisistaan erillään.

Ainoastaan rasvavoidelluille vierintälaakereille on olemassa suora kaava rasvamäärän laskemiseksi. Kaava (3) ottaa kuitenkin huomioon vain laakerin kokoluokan ja voiteluvälin, mutta ei esimerkiksi pyörimisnopeutta. Liuku- ja nivellaakereille sekä rasvatuille liukupinnoille ei yksiselitteistä ohjetta voitelumäärien laskemiseksi ole. Tämän vuoksi tässä diplomityössä mitoitetaan uudet rasvamäärät ja voiteluvälit voitelukohteille perustuen rasvan oletettuun hapettumisaikaan, lukuun ottamatta vierintälaakereita.

5.1 Rasvamäärien uudelleenmäärittäminen

Rasvamäärien uudelleenmäärittäminen aloitettiin havaitsemalla kriittiset voitelukohteet järjestelmästä, sekä kiinnittämällä huomiota kohteisiin, joissa ylivoitelu on runsasta myös visuaalisesti (kuva 32). Voitelun kannalta kriittisiä kohteita ovat vierintälaakerit siirtokelkassa ja ohjausnivelessä. Visuaalisesti ongelmallisia kohteita ovat ohjauslaitteiden nivellaakerit ja ohjausvarsien liukulaakerit ja näistä varsinkin alapuoliset laakerit.

Kuvan 13 mukaan jopa 40 % vierintälaakerivaurioista aiheutuu vanhentuneesta voiteluaineesta sekä kiinteistä epäpuhtauksista. Tästä syystä rasvan vaihtuvuus voitelukohteessa tietyn ajan kuluessa on tärkeää. Rasvan vanhentumiseen vaikuttaa suuresti muun muassa hapettuminen. Hapettuminen on hyvin vahvasti riippuvainen käytetystä rasvasta, vallitsevista käyttöolosuhteista, sekä käyttökohteesta. Kalmarin käyttämälle voitelurasvalle ei haluttu määrittää tarkkaa hapettumisaikaa, koska voiteluväliä ei ole tarkoitus asettaa niin pitkäksi. Rasvan täytyy vaihtua myös epäpuhtauksien poistamiseksi voitelukohteesta.

SKF:n (2009, s.35) testin mukaan keskikokoisen sähkömoottorin laakereiden voitelussa käytetty rasva ei menettänyt voiteluominaisuuksiaan kahden kuukauden käytön jälkeen. Käyttöolosuhteet sähkömoottorikäytössä eroavat huomattavasti konttilukin olosuhteista, koska satamaolosuhteissa konttilukin voitelukohteet joutuvat alttiiksi kosteudelle, pölylle ja muille epäpuhtauksille. Tästä syystä konttilukin tapauksessa järjestelmä säädetään siten, että voitelukohteissa olevat rasvamäärät vaihtuvat täysin vähintään yhden viikon välein. Tämän lisäksi rasva ehtii vanhentua jonkun aikaa voitelulinjoissa ennen voitelukohteille pääsyä, joten pidempi vaihtoväli ei tässä tapauksessa tule kysymykseen.

5.1.1 Nivellaakerit

Syötettävien rasvamäärien uudelleenmäärittämiseksi selvitettiin nivellaakerien rasvatilavuudet raidetankojen osalta. Raidetankojen nivellaakerien rasvatilavuus saatiin selvitettyä kokeella, jossa paineilmakäyttöisellä rasvapumpulla syötettiin rasvaa puhdistettuun raidetangon nivellaakeriin ja syöttö lopetettiin, kunnes nivellaakeri oli rasvattu silmämääräisesti. Syötetty rasvamäärä saatiin selville pumpun käyttöpistooliin kytkettyä digitaalisesta SKF:n LAGM 1000E -rasvamittarista (SKF 2017). Kuvassa 33 on esitetty kokeessa käytetty rasvamittari.



Kuva 33. SKF LAGM 1000E -rasvamittari. (SKF 2017)

Koe toistettiin neljälle nivellaakerille, jotta silmämääräisyydestä johtuva virhe minimoituisi. Kokeen suoritti Kalmarin Puolan tehdas. Testiä ei suoritettu erikseen ohjaussylinlerin nivellaakerille, koska laakerin kokoluokka on lähellä raidetangon pään nivellaakeria. Saatujen tuloksien tarkkuus on alle 300 barin rasvauspaineella ± 3 %, joka tässä tapauksessa on riittävä. Taulukkoon 8 on koottu testin tulokset.

Taulukko 8. Raidetangon nivellaakerin rasvatestin tulokset.

Nivellaakeri	Syötetty rasvamäärä [g]	Syötetty rasvatilavuus [cm ³]
1	2,5	2,78
2	2,5	2,78
3	2,6	2,89
4	2,1	2,33

Neljällä testillä raidetangon nivellaakerin rasvamääräksi saatiin keskiarvona 2,43 g eli rasvatilavuus on noin 2,7 cm³. Taulukosta 7 nähdään raidetangon pään nivellaakerille syötettävän rasvaa alkuperäisillä asetuksilla 1,80 cm³ 24 tunnissa. Tällöin rasva nivellaakerissa vaihtuu jopa 1,5 vuorokauden välein. Rasva ei kuitenkaan ehdi vanheta niin lyhyessä ajassa, joten harvempi vaihtumisväli riittäisi.

5.1.2 Liukulaakerit

Liukulaakereiden rasvatilavuuksia selvitetessäärkevin ratkaisu tässä tapauksessa oli laskea liukulaakerin välyksen sekä rasvauran syrjäyttämä tilavuus eli laakerin vapaa tilavuus. Varsinaisia liukulaakereita konttilukissa on pelkästään ohjausvarsien ylä- ja alapuoliset liukulaakerit.

Välyksen ja rasvauran tilavuuden selvittämiseksi oli tutkittava kyseisten liukulaakereiden piirustuksista tarvittavat mitat ja toleranssit (Kalmar 2002, Kalmar 2012a). Laskettaessa välyksen rasvatilavuutta lähtötiedoiksi tarvitaan toleranssien ääripäät laakerista ja pesästä sekä laakerin paksuus. Rasvauran tilavuus on laskettavissa, kun tiedetään rasvauran profiilin pinta-ala ja laakerin halkaisija. Taulukosta 9 nähdään lasketut rasvatilavuudet.

Taulukko 9. Lasketut rasvatilavuudet liukulaakereille.

Kohde	Rasvatilavuus (Rasvaura+vällys) [cm ³]	Tämänhetkinen syöttö cm ³ /25h	Rasvauran tilavuus [cm ³]	Välyksen tila- vuus [cm ³]
Ohjausvarren alapään laa- keri ja laake- ripesä	54,19	21,56	50,97	3,21
Ohjausvarren yläpään laa- kerin sisäke- hä	56,04	21,56	26,51	29,52

Liukulaakereiden rasvatilavuuksia ja tämänhetkistä syöttöä vertailemalla huomataan, että syötetyt määrät ovat moninkertaiset tarpeeseen nähden. Esimerkiksi alapään liukulaakerin rasvamäärä ehtii vaihtua kokonaan jo 2,5 vuorokaudessa ja viikon aikana laakeriin syötetään melkein kolme kertaa enemmän rasvaa kuin laakerin rasvatilavuus itsessään on. Sama ongelma on havaittavissa kuvan 32 oikeassa alareunassa. Syötetty rasvamäärä liukulaakereille täytyisi saada sellaiseksi, että rasvamäärä vaihtuu kokonaisuudessaan viikon aikana.

5.1.3 Vierintälaakerit

Suuntaviivana vierintälaakerien rasvamäärien mitoituksessa oli kaava (3), mutta siitä saatuja arvoja tarkasteltiin varauksin. Ohjausvivussa ja siirtokelkassa olevat vierintälaakerit eivät ole jatkuvassa pyörimisliikkeessä, mutta kaavassa esimerkiksi pyörimisnopeutta ei huomioida. Tällöin voidaan olettaa, että kaavasta saadut rasvamäärät ovat hieman yläkanttiin konttilukin vierintälaakereita ajatellen. Taulukkoon 10 on koottu vierintälaakereiden mitat, tämänhetkinen rasvansaanti ja laskettu rasvan tarve.

Taulukko 10. Vierintälaakereiden tiedot rasvamäärän arviointiin.

Kohde	Syöttö tällä hetkellä [cm ³ /24h]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	Rasvan tarve [g/päivä]	Rasvan tarve [cm ³ /päivä]
Ohjausvivun vierintälaakeri	3,59	215	58	12,47	13,86
Siirtokelkan laakerointi	4,79	68	30	2,04	2,27

Siirtokelkan laakerit saavat taulukon 3 mukaan tällä hetkellä yli kaksinkertaisen määrän rasvaa laskennalliseen tarpeeseen verrattuna ja huomioiden aikaisemmin mainitun laakerin epäsäännöllisen pyörimisen olisi syötettyä rasvamäärää syytä pienentää. Ohjausvivulla ongelma on päinvastainen ja laskennallinen tarve alittuu reilusti. Tässä tapauksessa rasvamäärän hallittu lisääminen on perusteltua.

5.1.4 Muut voitelukohteet

Konttilukin muille voitelukohteille ei kirjallisuudesta tai muista lähteistä löytynyt käytökelpoisia ohjeita rasvamäärien muuttamiseksi. Kuitenkin visuaalisesti havaitut ongelmat (kuva 32) kertovat liiallisesti rasvauksesta. Siksi rasvamääriä tulisi pienentää näkyvästi ja testata voitelun toimivuutta käytännössä pitkällä aikavälillä, jotta muutokset voitaisiin havaita.

Liukupalojen ja muiden voitelukohteiden rasvavoitelussa tärkeintä on voiteluaineen olemassaolo voitelukohteessa ja sen pysyvyys siellä. Tarkkoja tarvittavia määriä ei näissä kohteissa pystytä arvioimaan, vaan ne täytyy yrityksen ja erehdyksen kautta saada sopiviksi voitelukohteittain.

5.2 Uudet rasvamäärät

Syötettyjä rasvamääriä mallinnettiin Excel-pohjalla (liite C) muuttaen kytkentöjä, jakajia sekä pumppuysiköiden tuottoja. Eri vaihtoehtoja kokeilemalla oli tarkoitus löytää sopivat tuotot pumppuysiköille ja jakajien sijoittelulle, jotta voitelukohteille syötetyt

rasva-arvot olisivat lähellä ajatusmallia, jossa rasva vaihtuisi kokonaan ainakin viikon välein voitelukohteittain. Taulukkoon 11 on koottu ehdotelma uusiksi rasvamääriksi nykyiselle voitelujärjestelmälle.

Taulukko 11. Uudet rasvamäärät nykyiselle voitelujärjestelmälle.

Kohde	Syöttö alkuperäisillä asetuksilla [cm ³ /24h]	Syöttö uusilla asetuksilla [cm ³ /24h]	Muutos [cm ³ /24h]	Syöttö alkuperäisillä asetuksilla [cm ³ /vko]	Syöttö uusilla asetuksilla [cm ³ /vko]
Lenkki	2,40	1,20	-1,20	16,77	8,39
Lukkolaite	9,58	4,79	-4,79	67,08	33,54
Ohjaussylinteri nivellaakeri	1,80	1,08	-0,72	12,58	7,55
Ohjausvarren liukulaakeri, ala	21,56	8,09	-13,48	150,94	56,60
Ohjausvarren liukulaakeri, ylä	21,56	8,09	-13,48	150,94	56,60
Ohjausvivun vierintälaakerit	3,59	10,78	+7,19	25,16	75,47
Pilarin liukujohde	21,56	10,78	-10,78	150,94	75,47
Raidetangon pään nivellaakeri	1,80	1,08	-0,72	12,58	7,55
Siirtokelkan vierintälaakeri	4,79	2,40	-2,40	33,54	16,77
T-palkin keski-liukupalat	4,79	2,40	-2,40	33,54	16,77
T-palkin liukupala, alapää	28,75	14,38	-14,38	201,25	100,63
T-palkin liukupalat, yläpää	14,38	7,19	-7,19	100,63	50,31

5.3 Muutoksien toteutus käytännössä

Liitteessä D on esitetty voitelukaavio nykyisen järjestelmän kehitetystä versiosta. Kaaviossa merkittävimmät muutokset ovat sivurunkojen ensimmäisten jakajien yhden portin tulppauksen avaaminen ja siitä voitelulinjan vetäminen suoraan ohjausvivulle. Toinen kaaviossa näkyvä muutos on ohjauslaitteiden jakajien muuttaminen 12-porttisista 10-porttisiksi, koska voitelulinja ohjausvivulle menee suoraan ensimmäisen jakajan kautta.

Rasvamäärien muuttamiseksi järjestelmään täytyy tehdä pieniä muutoksia. Uudet suunnitellut rasvamäärät saadaan voitelukohteille seuraavilla toimenpiteillä:

- Sivurunkojen pumppuyksiköiden mitta R pienennetään arvosta 19,5 mm arvoon 18,0 mm. Tällöin pumppuyksikköjen tuotot putoavat 50 %:sta 25 %:iin.
- Tarttujan pumppuyksikön mitta R arvosta 22,5 mm arvoon 19,5 mm. Tällöin pumppuyksikön tuotto putoaa 100 %:sta 50 %:iin.
- Sivurungoissa voitelulinjan ensimmäisen jakajan portti numero 7:n tulppaus avataan, ja letkutetaan siitä voitelulinja suoraan ohjausvivulle (samaa reittiä kuin ohjauslaitteiden jakajalle menevä linja).
- Ohjauslaitteiden 12-porttinen jakaja vaihdetaan molemmista sivurungoista 10-porttiseen jakajaan ja siihen kytketään kaikki vanhassa jakajassa kiinni olleet letkut paitsi ohjausvivulle menevä. Tällöin ohjausvivun voitelu jää tästä jakajasta pois kuten kuuluukin.
- Pumppausaika pidetään vakiona 25 minuutissa ja taukoaika 350 minuutissa.

Kehitysehdotukset suunniteltiin mahdollisimman helposti toteutettaviksi. Näin ollen testaaminen kehitetyllä järjestelmällä on kustannustehokasta toteuttaa, eikä kynnystä suurten ja aikaa vievien muutoksien tekemiselle ja purkamiselle ole.

5.4 Suorituskyvyn arviointi uusilla rasvamäärillä

Taulukkoa 12 katsomalla huomataan, että tarttujalla lenkin, lukkolaitteen, pilarin liukujohteiden ja liukupalojen voitelua on pienennetty 50 %:lla. Näin suuri vähennys on perusteltua, jotta muutos voitelun toimivuudessa voitaisiin havaita nopeammin. Tarttujalla on ilmennyt myös visuaalisesti havaittua ylivoitelua (kuva 32). Mikäli tarttujan voitelukohteissa ilmenee alivoitelua, voidaan tähän reagoida suurentamalla tarttujan pumppuyksikön tuottoa.

Nivellaakereille rasvasyöttöä pienennettiin 40 % alkuperäisestä. Uusilla asetuksilla rasva vaihtuu nivellaakerilla noin kolmessa päivässä rasvan syötön ollessa noin 1 cm^3 vuorokaudessa ja nivellaakerin rasvatilavuus noin $2,7 \text{ cm}^3$. Nivellaakereiden tapauksessa tiheämpi voiteluväli on tarkoituksen mukaista, kun kyseessä on avonainen voitelukohde. Nivellaakerit ovat alttiita ympäristöolosuhteille, kuten vedelle, pölylle ja muulle lialle ja vallitsevat olosuhteet voivat pyyhkiä rasvan pois nivellaakerista.

Ohjausvarren liukulaakereilla voitelumäärät tiputettiin melkein kolmasosaan alkuperäisestä. Syötetty määrä alkuperäisellä järjestelmällä oli lähes kolminkertaisesti liukulaakerin rasvatilavuus. Näin suuri rasvamäärä etsii tiensä ulos voitelukohteesta, kuten kuvan 32 oikea alareuna osoittaa. Uusilla asetuksilla syötetty voitelumäärä on viikkotasolla sama kuin liukulaakerin rasvatilavuus (taulukko 12). Ohjausvarren liukulaakerit ovat hyvin suojassa vallitsevilta olosuhteilta, joten rasvan vaihtuminen täysin kerran viikossa voidaan olettaa riittäväksi.

Vierintälaakerikohteiden rasvamääriä mitoitettaessa hyödynnettiin kaavaa 3. Ohjausvivulle rasvansyöttöä kasvatettiin kolminkertaiseksi, mutta tämäkään ei vastaa kaavan 3 ehdottamaa rasvamäärää. Ohjausvipu ei tee kokonaispyörimisliikkeitä, jolloin rasvan vatkautuminen laakerissa on pienempää kuin koko ajan pyörivässä laakerissa ja rasvan tarve on tällöin pienempi. Siirtokelkan vierintälaakerit saivat kaksinkertaisen määrän rasvaa verrattuna kaavasta 3 saatuun arvoon. Uusilla asetuksilla syötetty rasvamäärä on pudotettu vastaamaan laskennallista tarvetta.

Ehdotetut rasvamäärät eivät välttämättä paranna voitelun toimivuutta käytännössä, joten asetuksia on testattava yhdellä koneella ennen jatkotoimenpiteitä. Tällöin voidaan varmistua siitä, autoivatko uudet asetukset hillitsemään ylivoitelua ja saatiinko voitelujärjestelmää todella kehitettyä tehdyillä muutoksilla. Kaiken kaikkiaan viikossa syötettyä rasvamäärää saatiin pienennettyä noin puoleen alkuperäisestä.

Taulukko 12. Kehitetyn järjestelmän syöttämät rasvamäärät viikkotasolla.

Kohde	Syöttö alkuperäisillä asetuksilla [cm ³ /vko]	Syöttö uusilla asetuksilla [cm ³ /vko]	Syötön muutos [cm ³ /vko]	Rasva-tilavuus [cm ³]	Leveys [mm]	Paksuus [mm]	Rasvan tarve [cm ³ /päivä] per laakeri
Lenkki	16,77	8,39	-8,39				
Lukkolaite	67,08	33,54	-33,54				
Pilarin liukujohde	150,94	75,47	-75,47				
T-palkin keski-liukupalat	33,54	16,77	-16,77				
T-palkin liukupala, alapää	201,25	100,63	-100,63				
T-palkin liukupalat, yläpää	100,63	50,31	-50,31				
Ohjaussylinterin nivellaakeri	12,58	7,55	-5,03		70	49	-
Raidetangon pään nivellaakeri	12,58	7,55	-5,03	2,70	50	35	-
Ohjausvarren liukulaakeri, ala	150,94	56,60	-94,34	54,19	270	102	-
Ohjausvarren liukulaakeri, ylä	150,94	56,60	-94,34	56,04	211	83	-
Ohjausvivun vierintälaakerit	25,16	75,47	+50,31		215	58	13,86
Siirtokelkan vierintälaakeri	33,54	16,77	-16,77		68	30	2,27

Liitteen C Excel-tilukkoa muokattiin sopivaksi kehitetylle järjestelmälle (liite E). Tällä tavoin pystyttiin varmistamaan syötetyt rasvamäärät voitelupisteittäin myös kehitetylle järjestelmälle.

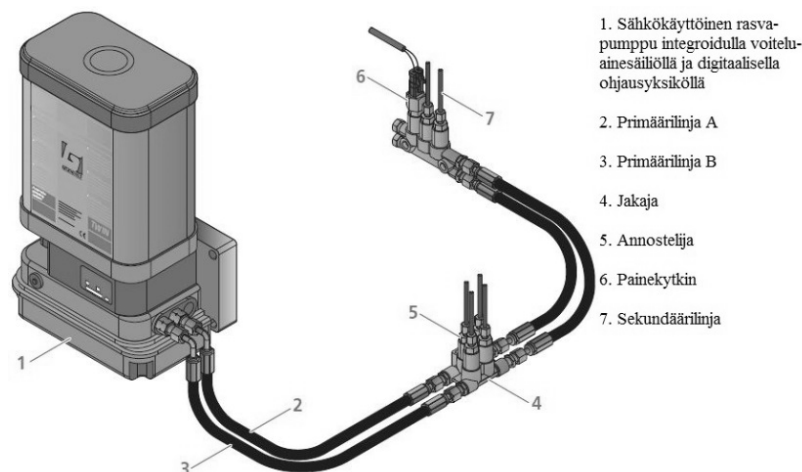
6. VAIHTOEHTOINEN RASVAVOITELUJÄRJESTELMÄ

Nykyisen voitelujärjestelmän kehittämisen lisäksi tässä työssä tutustutaan vaihtoehtoiseen keskusvoitelujärjestelmään, joka voi mahdollisesti korvata nykyisen Lincolnin järjestelmän. Markkinoilta löytyy monen eri valmistajan rasvavoitelujärjestelmiä, mutta tässä diplomityössä esitellään Groeneveld-nimisen voitelulaitetoimittajan eräs ratkaisu nykyisen järjestelmän korvaajaksi.

Groeneveld valikoitui vertailukohteeksi, koska Kalmarilla on aikaisempaa historiaa kyseisen toimittajan kanssa. Nykyisen järjestelmän ollessa progressiivinen, oli työn kannalta mielekkäämpää valita erityyppinen järjestelmä vertailtavaksi. Tästä syystä vaihtoehtoiseksi järjestelmäksi valikoitui kaksilinjainen järjestelmä Groeneveld Twin-3.

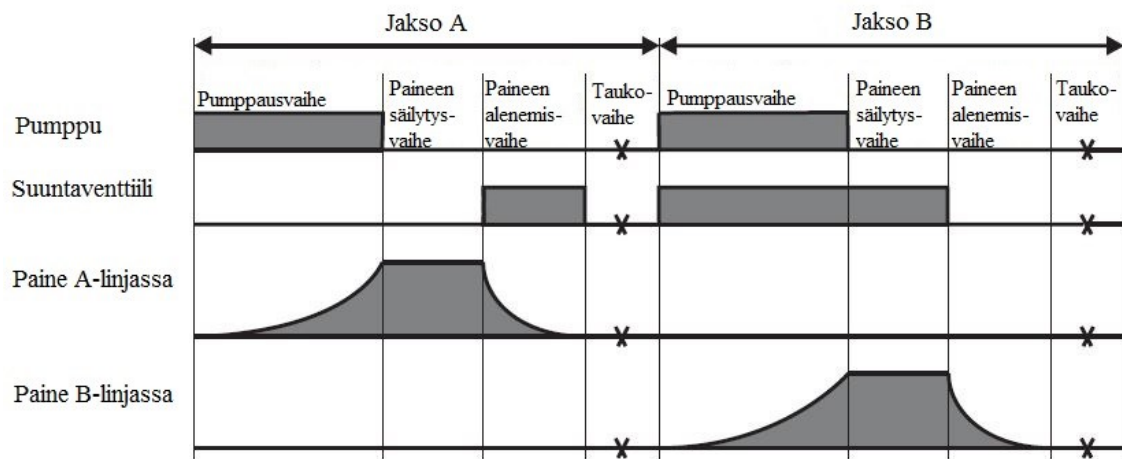
6.1 Groeneveld Twin-3

Groeneveld Twin-3 on kaksilinjainen voitelujärjestelmä, joka on tarkoitettu erityisesti NLGI 2 -luokan voitelurasvoille. Toimintaperiaatteeltaan kaksilinjainen järjestelmä eroaa progressiivisesta järjestelmästä täysin. Kuvassa 34 on esitetty Twin-3 -järjestelmän pääkomponentit. (Groeneveld 2013, s.7)



Kuva 34. Groeneveld Twin-3 -järjestelmän pääkomponentit. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.7)

Kaksilinjaisen voitelujärjestelmän toimintaperiaate perustuu peräkkäisiin voitelujaksoihin ja voitelujaksot jakautuvat neljään eri vaiheeseen. Voitelujaksot suoritetaan vuorotellen A- ja B-linjojen välillä. Pumppuyksikköön integroitu 5/2-suuntaventtiili määrää, kumpi voitelulinja on kytketty pumppuun ja kumpi voiteluainesäiliöön. Täyden voitelujakson kesto on ennalta määrätty, vaikkakin neljän vaiheen ottama aika riippuu vallitsevista olosuhteista. (Groeneveld 2013, s.8) Kuvassa 35 on esitetty voitelujaksot ja niiden sisältämät vaiheet.



Kuva 35. Voitelujaksot ja niiden sisältämät vaiheet. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.8)

6.1.1 Voitelujaksot ja -vaiheet

Voitelujakso A alkaa pumppausvaiheella, jolloin rasva pumpataan voiteluainesäiliöstä primäärilinjaa A pitkin jakajille. Pumppausvaihe päättyy, kun paine saavuttaa ennalta määrätyn tason painekeytimen kohdalla. Halutun painetason saavuttamiseksi tarvittava aika riippuu useammasta tekijästä, kuten lämpötilasta, rasvan koostumuksesta ja voitelujärjestelmän laajuudesta. Pumppausvaiheen aikana annostelijat työntävät tietyn annoksen rasvaa sekundäärilinjaan ja sitä kautta voitelukohteille. (Groeneveld 2013, s.8)

Pumppausvaiheen päätyttyä seuraa paineensäilytysvaihe, jossa pumppausvaiheessa saavutettua painetta pidetään yllä. Tällä varmistetaan, että jakajien annostelijat ehtivät työntää rasva-annoksen voitelukohteille, jos ne eivät sitä ehtineet pumppausvaiheessa tekemään. Paineensäilytysvaiheen pituus riippuu pumppausvaiheen pituudesta. Tätä riippuvuutta kuvataan termillä *vmf* (venting multiply factor). Vmf-arvon ollessa 1.0, pumppaus- ja paineensäilytysjaksot ovat yhtä pitkät. Jos vmf-arvo on 10, säilytysvaihe on 10 kertaa pidempi kuin pumppausvaihe. (Groeneveld 2013, s.8)

Seuraava vaihe on paineenalennusvaihe, jonka aikana paine alenee A-linjassa suuntaventtiilin kautta. Jotta tämä voisi tapahtua, suuntaventtiilin täytyy liikkua toiseen asentoon, jolloin paine laskee primäärilinjassa A, ja rasva virtaa takaisin voiteluainesäiliöön. Paineenalennusvaiheen pituus on yhtä pitkä kuin paineensäilytysvaihe ja siten myös

verrannollinen pumppausvaiheen pituuteen. Jos voitelujärjestelmä vaatii pitkän ajan halutun painetason saavuttamiseen, menee sillä myös enemmän aikaa kyseisen paineen alentamiseksi lähtötasolle. (Groeneveld 2013, s.9)

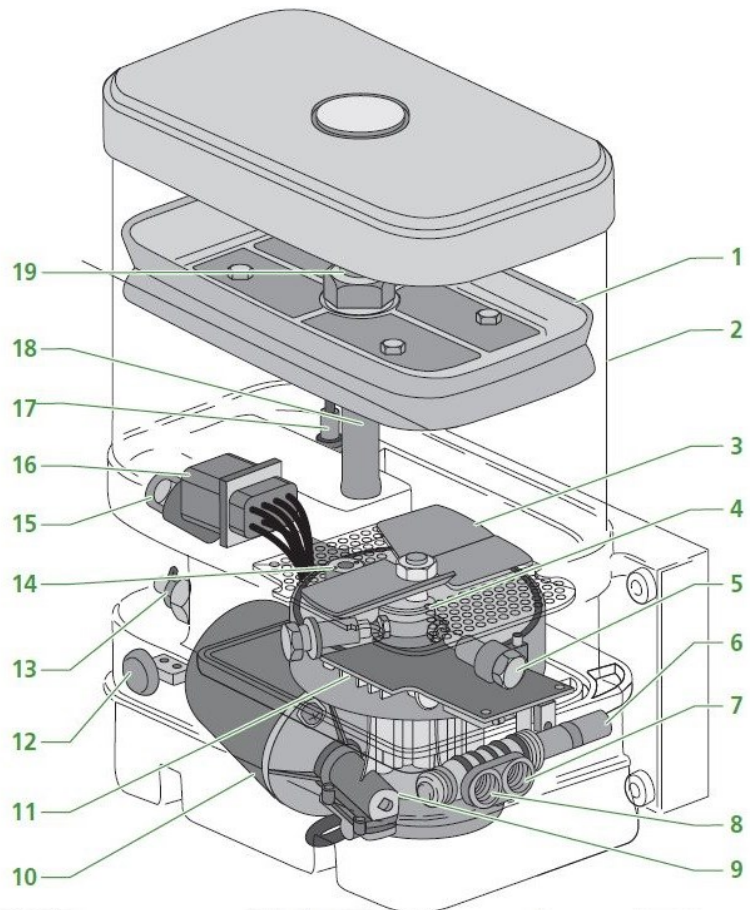
Taukovaihe seuraa paineenalenemisvaiheen jälkeen ennen kuin pumppausvaihe B-linjaan alkaa. Taukovaiheessa pumppu ei pyöri ja vaiheen pituus riippuu ennalta määrätystä voitelujakson ajasta vähennettynä muihin vaiheisiin käytetty aika. Pumppaus-, paineensäilytys-, ja paineenalenemisvaiheet järjestelmä suorittaa kokonaisina, mutta taukovaiheen se jättää välistä, jos ennalta määrätty voitelujakson aika on ylitetty. Tällöin seuraava voitelujakso alkaa heti edellisen perään. (Groeneveld 2013, s.9)

Voitelujakso B alkaa edellisen jakson taukovaiheen päätyttyä. Ohjausyksikkö käynnistää pumpun ja pumppaus- ja paineensäilytysvaiheen aikana suuntaventtiili on asennossa, jossa pumppu on kytketty primäärilinjaan B. Linja A on kytketty pois pumpusta ja yhdistetty voiteluainesäiliöön. Paineenalenemisvaiheen aikana suuntaventtiili vaihtaa jälleen asentoon, jolloin paine linjassa B laskee ja rasva pääsee virtaamaan takaisin voiteluainesäiliöön. (Groeneveld 2013, s.9)

6.1.2 Pumppuyksikkö

Pumppuyksikkö koostuu sähkömoottorista, jonka avulla käytetään kolmea säteittäisesti asetettua sylinteriä ja mäntää. Sähkömoottori pyörittää käyttöakselia mekaanisen vaihteen kautta. Epäkesko on kiinnitetty akseliin ja sen avulla kolmea mäntää liikutetaan edestakaisin. Tällöin rasva pumpataan jakajille primäärilinoja pitkin. Epäkeskon lisäksi akseli pyörittää sekoitusvaihdetta, joka painaa rasvaa alaspäin kohti mäntiä. Puristuskanava on sijoitettu pumpun ja primäärilinojen väliin. Paineenrajoitusventtiili ja 5/2-suuntaventtiili ovat sijoitettuna puristuskanavaan. Kuvasta 36 voidaan nähdä pumppuyksikön komponentit. (Groeneveld 2013, s.10)

1. Kannatuslevy
2. Voiteluainesäiliö
3. Sekoitusvaihde
4. Epäkesko
5. Sylinterit ja männät
6. 5/2 suuntaventtiili
7. Primäärilinja A-lähtö
8. Primäärilinja B-lähtö
9. Mekaaninen vaihde
10. Sähkömoottori
11. Ohjausyksikkö
12. Testauspainike
13. Täyttöyhde ja rasvasuodin
14. Paineenrajoitusventtiili
15. Ylivuotoulostulo
16. Pistoke
17. Alarajakytkin
18. Kannatuslevyn tanko
19. Vuoto- ja ylivirtauskanava, yhteydessä ylivuotoulostuloon

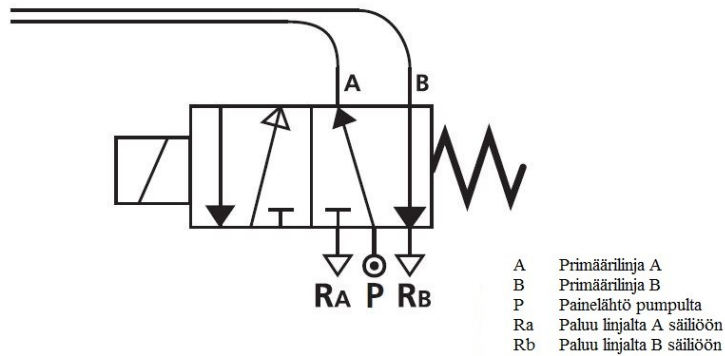


Kuva 36. Pumppuyksikön komponentit. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.10)

Paineenrajoitusventtiili suojaa järjestelmää ja ohjaa rasvan takaisin säiliöön, jos järjestelmän painetaso ylittää 250 bar. Suuntaventtiilillä määrätään kumpi A- tai B-linjasta on paineistettuna ja hoitaa rasvauksen. Venttiilillä on suuri merkitys neljän eri vaiheen läpiviennissä rasvausjaksoa kohden. (Groeneveld 2013, s.10)

6.1.3 Suuntaventtiili

Suuntaventtiilin ollessa normaaliasennossa, rasvaus tapahtuu primäärilinja A:n kautta ja paine linjassa B alenee rasvan virratessa takaisin säiliöön. Kun ohjausyksikkö kytkee suuntaventtiilin päälle ja se liikkuu toiseen asentoon, painelähtö kytkeytyy B-linjaan ja A-linja paluuporttiin R_A . Tällöin rasvausjakso alkaa B-linjassa ja paine laskee A-linjassa. Kuvassa 37 on suuntaventtiilin piirrosmerkki. (Groeneveld 2013, s.14)

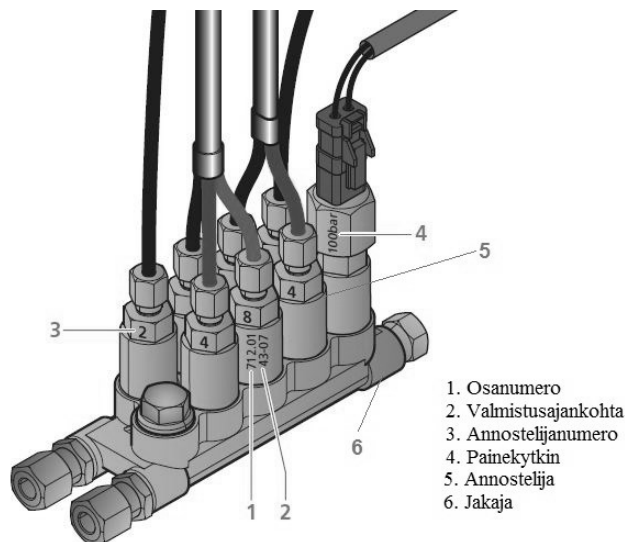


Kuva 37. Suuntaventtiilin piirrosmerkki. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.14)

Groeneveldin kaksilinjainen järjestelmä eroaa suuntaventtiilin osalta muiden valmistajien kaksilinjaisista siten, että suuntaventtiili on integroitu pumppuyksikköön. Esimerkiksi SKF:n (2015a, s.8) järjestelmässä suuntaventtiili on pumpusta irrallaan (kuva 12).

6.1.4 Jakajat ja annostelijat

Jakajablokkeihin kiinnitettäviä annostelijoita on saatavilla useampaa eri kokoa ja niillä kaikilla on eri rasvansyöttötilavuus voitelujaksoa kohden. Jokaiselle voitelupisteelle voidaan siten syöttää haluttu määrä voiteluainetta. Kuvassa 38 on esitetty jakaja, annostelijat sekä painekytin. (Groeneveld 2013, s.16)



Kuva 38. Jakaja, annostelijat ja painekytin. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.16)

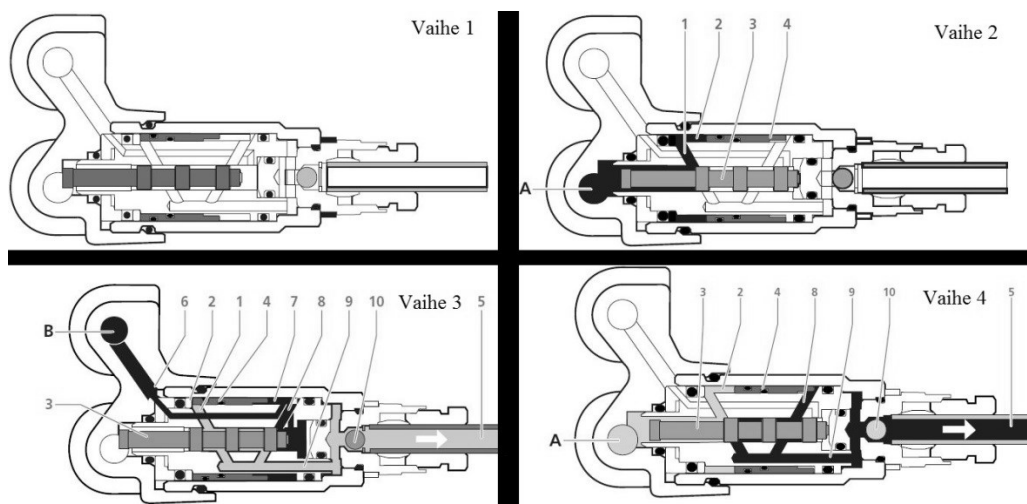
Annostelijat kiinnitetään jakajiin, joita on saatavissa 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 18, 20, 21 tai 22 ulostuloportilla varustettuna. Voitelupisteet yhdistetään näihin portteihin annostelijoiden sekä sekundaarilinjojen kautta. Käyttämättömät portit voidaan tulpata ilman, että se vaikuttaa muiden annostelijoiden toimintaa. Myös painekytin on mahdollista kiinnittää jakajaan. (Groeneveld 2013, s.16)

Jakajia sekä annostelijoita on saatavilla messingistä tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuina. Keskenään erilaiset annostelijat erotetaan toisistaan niissä näkyvillä numeroilla (kuva 38). Taulukkoon 13 on koottu eri annostelijavaihtoehdot. (Groeneveld 2013, s.16)

Taulukko 13. Eri annostelijavaihtoehdot. (Groeneveld 2013, s.16)

Annostelijanumero	Rasvan syöttö per voitelujakso [cm ³]
0	0,025
1	0,050
2	0,100
3	0,150
4	0,200
5	0,250
6	0,300
7	0,350
8	0,400
8,5	0,700
9	1,000
10	2,000
11	4,000

Annostelijan toiminta perustuu sen sisäisen männän edestakaiseen liikkeeseen, joka saadaan aikaan paineistamalla vuoron perään primäärilinjoi A ja B. Kuvassa 39 on kuvattuna 4 eri vaihetta annostelijan toiminnasta.



Kuva 39. Annostelijan toimintaperiaate. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2013, s.17–18)

Vaihe 1 alkaa, kun järjestelmä ei ole vielä täyttynyt rasvasta. Annostelijan vaiheen 2 aikana voitelujakson A pumppausvaihe on käynnissä ja paine järjestelmässä nousee. Tällöin mäntä 3 työntyy oikealle ja avaa kanavan 1. Kammio 2 täyttyy rasvalla kanavan 1 kautta ja työntää mäntää 4 oikealle. Pumppausvaiheen jälkeisillä vaiheilla ei ole vai-

kutusta annostelijan toimintaan, vaan paine laskee järjestelmässä. (Groeneveld 2013, s.17)

Vaiheen 3 alkaessa primäärilinja B paineistuu ja rasva painautuu kanavasta 6 sisään annostelijaan. Paine työntää männän 3 takaisin vasemmalle, jolloin kanava 8 avautuu. Rasva täyttää kammion 7 ja työntää myös männän 4 takaisin vasemmalle. Kammion 2 sisältämä rasvamäärä työntyy voitelukohteelle primäärilinjaa pitkin kanavan 1, männän 3 ja kanavan 9 läpi, kun vastaventtiili 10 avautuu. (Groeneveld 2013, s.18)

Neljäs vaihe on muuten samanlainen kuin vaihe 2, paitsi nyt kammio (vaihe 3, kohta 7) on täytynyt rasvalla aikaisemmin. Mäntä 4 työntyy oikealle, kun kammio 2 täyttyy. Nyt kammion (vaihe 3, kohta 7) sisältämä rasvamäärä työntyy voitelukohteelle primäärilinjaa pitkin kanavan 8, männän 3 ja kanavan 9 läpi, kun vastaventtiili 10 avautuu. Järjestelmän varsinaisen toiminnan aikana vaiheet 3 ja 4 vuorottelevat. (Groeneveld 2013, s.18)

6.1.5 Painekeytkin

Ohjausyksikkö saa tiedon painekeytkimeltä, kun haluttu painetaso on saavutettu järjestelmässä pumppausvaiheen aikana ja tällöin ohjausyksikkö sammuttaa pumpun. Jos vaadittua painetasoa ei ole saavutettu, pumppausvaihe päättyy vasta, kun maksimi pumppausaika on kulunut. Tällöin järjestelmä tekee hälytyksen. (Groeneveld 2013, s.19)

Painekeytkin asennetaan mieluiten kiinni jakajaan ja sijoitetaan järjestelmän perimmäiseen päähän mahdollisimman kauas pumppuyksiköstä. Tällä varmistetaan, että vaadittu painetaso saavutetaan myös kauimmaisen jakajan kohdalla. Jos käytännön syistä painekeytkimen sijoittaminen on järkevämpää esimerkiksi keskelle järjestelmää, voidaan asentaa korkeamman paineen painekeytkin. Painekeytkimiä on saatavilla 100, 125, 150 ja 175 barin asetuksilla. (Groeneveld 2013, s.19)

6.2 Järjestelmän mitoitus konttilukille

Tavoitteeksi järjestelmän mitoituksessa asetettiin alustavan järjestelmäkaavion sekä osalistan suunnittelu. Lähtöarvoina vaihtoehtoisen järjestelmän periaatesuunnittelussa toimivat alkuperäisen järjestelmän uudet rasvamäärät. Uuden järjestelmän suunnittelun ensimmäinen vaihe oli päättää voitelusyklien määrä vuorokaudessa. Näin ollen syötetyt voitelumäärät olisivat järjestelmien välillä vertailukelpoisia.

Koska vaihtoehtoisen järjestelmän toimintaa ei ollut mahdollista testata käytännössä, oletettiin, että järjestelmä ehtii käydä läpi 14 voitelujaksoa vuorokaudessa. Kun voitelujaksojen määrä oli valittu, seuraavaksi selvitettiin annostelijoiden koot oikeiksi voitelupisteittäin, jotta syötetyt rasvamäärät saatiin mahdollisimman lähelle taulukon 11 arvo-

ja. Annostelijoiden koot ja sitä kautta syötetyt rasvamäärät vuorokaudessa laskettiin Excel-taulukkoon (liite F). Taulukkoon 14 on koottu vaihtoehtoisen järjestelmän syöttämät rasvamäärät vuorokaudessa.

Taulukko 14. *Vaihtoehtoisen järjestelmän syöttämät rasvamäärät vuorokaudessa.*

Kohde	Syöttö uusilla asetuksilla (vanha järjestelmä) [cm ³ /24h]	Todellinen syötetty rasvamäärä (vaihtoehtoinen järjestelmä) [cm ³ /24h]
Lenkki	1,20	1,40
Lukkolaite	4,79	4,90
Ohjaussylinteri nivellaakeri	1,08	0,70
Ohjausvarren liukulaakeri, ala	8,09	8,40
Ohjausvarren liukulaakeri, ylä	8,09	8,40
Ohjausvivun vierintälaakerit	10,78	9,80
Pilarin liukujohde	10,78	9,80
Raidetangon pään nivellaakeri	1,08	0,70
Siirtokelkan laakerointi	2,40	2,80
T-palkin keskiliukupalat	2,40	2,80
T-palkin liukupala, alapää	14,38	14,00
T-palkin liukupalat, yläpää	7,19	9,80

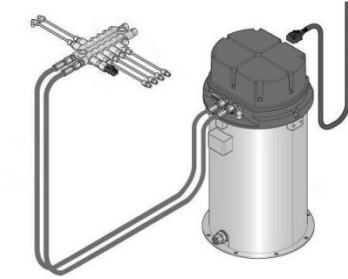
Liitteessä F laskettiin ensin annostelijan teoreettinen koko jakamalla kehitetyn järjestelmän voitelukohteelle syöttämä rasvamäärä voitelujaksojen määrällä vuorokaudessa. Tässä suunnitelmassa voitelujaksoja on vuorokaudessa 14 kappaletta. Kun annostelijoiden teoreettiset tilavuudet oli laskettu, valittiin lähimpänä teoreettista arvoa olevat annostelijakoot. Yksittäiseen voitelusykliin kuluva aikaa ei voida tietää varmasti ilman testausta, siksi tarkkojen arvojen saamiseksi kaksilinjaista järjestelmää tulee testata konttilukissa käytännössä.

6.3 Komponentit ja voitelukaavio

Konttilukin voitelukohteiden jakautuminen kolmelle eri sijainnille tekee voitelujärjestelmästä suhteellisen laajan. Vaihtoehtoina primäärilinjan reitille on joko sen vetäminen molempien sivurunkojen kautta tarttujalle yhtenäisenä linjana tai primäärilinjan jakaminen kolmeksi eri haaralinjaksi. Groeneveldin manuaalissa (2013) primäärilinjan haaroittamista ei käsitelty. Groeneveld on toteuttanut keskusvoitelun erään toisen valmistajan konttilukkiin Twin-3 XL -järjestelmällä, johon haaroitus on tehty, mutta haaralinjoja on vain kaksi (Groeneveld 2014).

Myös tämän työn kohteena olevaan ESC350-lukkiin voitaisiin pumppuyksiköksi valita normaalin Twin-3:n tilalle Twin-3 XL. Jälkimmäinen versio on toiminnaltaan vastaava kuin normaali Twin-3, mutta pumpun tuotto on 20 cm³/min, kun se Twin-3:ssa on 12

cm³/min. Twin-3 XL:n voiteluainesäiliön koko on 18 litraa. (Groeneveld 2015) Suuremmalla tuotolla varmistetaan, että paineistusvaiheessa järjestelmä saavuttaa halutun painetason nopeammin laajassa järjestelmässä. Kuvasta 40 voidaan nähdä Twin-3 XL pumppuyksikkö.



Kuva 40. Groeneveld Twin-3 XL -pumppuyksikkö. Perustuu lähteeseen (Groeneveld 2017)

Vaihtoehtoinen järjestelmä tarvitsee 14 jakajaa, joihin kiinnitetään yhteensä 94 annostelijaa. Annostelijoita tulee siis yksi per voitelupiste. Jakajia tarvitaan kolme vähemmän kuin alkuperäisessä järjestelmässä, koska vanhan järjestelmän linjojen ensimmäiset jakajat voidaan jättää pois. Liitteessä G on esitetty voitelukaavio vaihtoehtoiselle järjestelmälle ja taulukkoon 15 koottu järjestelmän osaluettelo.

Taulukko 15. Vaihtoehtoisen järjestelmän osaluettelo.

Osa-numero	Osan nimi	Määrä (kpl)	Kommentti
1	Groeneveld Twin XL pumppuyksikkö	1	18 litrainen voiteluainesäiliö
2	Jakaja, 4-porttinen	6	
3	Jakaja, 8-porttinen	5	
4	Jakaja, 9-porttinen	1	
5	Jakaja, 12-porttinen	2	
6	Annostelija, tyyppinumero 1	20	
7	Annostelija, tyyppinumero 2	8	
8	Annostelija, tyyppinumero 4	12	
9	Annostelija, tyyppinumero 6	32	
10	Annostelija, tyyppinumero 7	4	
11	Annostelija, tyyppinumero 8,5	14	
12	Annostelija, tyyppinumero 9	4	
13	Paineanturi, 100 bar	1	
14	Letkut	-	Asennukseen tarvittavat letkut
15	Putket	-	Asennukseen tarvittavat putket
16	Muut tarvikkeet	-	Muut tarvikkeet varmistettava

6.4 Vaihtoehtoisen järjestelmän suorituskyvyn arviointi

Vaihtoehtoista järjestelmää mitoitettaessa päästiin rasvamäärien syötössä samalle tasolle kuin Lincolnin kehitetyssä järjestelmässä. Kaksilinjaisessa järjestelmässä rasvamäärien säätäminen on voitelukohteittain helppoa, kun se voidaan tehdä annostelijakokoa muuttamalla.

On kuitenkin huomioitava, että saatavilla olevia annostelijakokoja on rajattu määrä, jolloin voitelujaksojen määrä vaikuttaa suuresti voitelun toimivuuteen ja säätämisen joustavuuteen. Voitelujaksojen harventaminen suurentaa käytettäviä annostelijakokoja ja isojen kokojen väliset tilavuuserot ovat aina kertaluokkaa suurempia verrattuna pienempien kokojen tilavuuseroihin. Taulukosta 13 voidaan todeta kahden suurimman annostelijan tilavuuksien erotukseksi jopa 2 cm^3 , mutta annostelijoiden 1 ja 3 välinen tilavuusero on vain $0,1 \text{ cm}^3$. Tämän vuoksi on perusteltua valita voitelujaksojen määrä mieluummin suuremmaksi. Järjestelmää suunniteltaessa tulee kuitenkin varmistua, että voitelujaksojen määrä on järjestelmän puolesta toteutettavissa, jolloin kaikki voitelujaksot ja niiden sisältämät vaiheet ehditään suorittaa.

Nivellaakereille valittiin pykälää pienempi annostelijakoko, jotta laakereille syötettyjä rasvamääriä saataisiin entisestään pienennettyä. Vaihtoehtoisella järjestelmällä rasva vaihtuisi nivellaakerilla noin neljän vuorokauden välein, minkä voidaan olettaa olevan edelleen riittävää. Ohjausvivun vierintälaakereille ja pilarin liukujohteille päädyttiin valitsemaan pykälää pienemmät annostelijat, jotta voitelun toimivuutta voitaisiin ensin seurata pienemmällä määrällä. Seuraava annostelijakoko olisi ollut $0,3 \text{ cm}^3$ suurempi, mikä olisi tarkoittanut vuorokausitasolla yli 4 cm^3 suurempaa rasvamäärää. Muiden voitelukohteiden osalta rasvamäärät ovat vähintään 1 cm^3 :n tarkkuudella samaa suuruusluokkaa kuin Lincolnin kehitetyn järjestelmän syöttämät määrät.

Groeneveldin kaksilinjaisen järjestelmän toimintapaine on 100 bar. Tällä painetasolla annostelijat syöttävät tietyn annoksen rasvaa voitelukohteille. Tukoksen sattuessa pumppuyksikkö on suojattu ylipaineelta paineenrajoitusventtiilillä, joka aktivoituu 250 barin paineessa (Groeneveld 2013, s.10). Tämä estää järjestelmän rikkoutumisen ylipaineen vaikutuksesta. Varsinainen paineanturi on voitelukaaviossa (liite G) sijoitettu järjestelmän kaukaisimpaan päähän, koska painetaso saavuttaa halutun arvonsiellä viimeiseksi.

Voitelujaksoon kuluva aika ei voida varmistaa ilman testaamista, mutta voitelujärjestelmän tarvitsema rasvamäärä voitelujaksoa kohden on noin 29 cm^3 ja pumpun syöttö minuutissa 20 cm^3 . Tällöin 30 cm^3 :n pumppaamiseen kuluu aikaa noin 1,5 minuuttia. Rasvaa virtaa primäärilinjasta aina jonkin verran takaisin säiliöön paineistusvaiheen jälkeen, jolloin syötettävä rasvamäärä voitelujaksoa kohden on suurempi. Taulukossa 16 on esitetty annostelijoiden syöttämät rasvamäärät voitelujaksoa kohden.

Taulukko 16. *Annostelijoiden syöttämät rasvamäärät voitelujaksoa kohden.*

Annostelijan tyyppinumero	Annostelijan todellinen koko [cm ³]	Annostelijoiden määrä	Rasvamäärä per voitelujakso [cm ³]
1	0,05	20	1
2	0,1	8	0,8
4	0,2	12	2,4
6	0,3	32	9,6
7	0,35	4	1,4
8,5	0,7	14	9,8
9	1	4	4
Yhteensä [cm³]			29

Lincolnin järjestelmässä käytetään 30 litran voiteluainesäiliötä, kun taas Groeneveldin järjestelmään valikoitiin 18 litran säiliö. Pienentyneillä rasvamäärillä pienempi säiliö riittää Kalmarin (2016b, s.44) määrittämälle 1000 tunnin huoltovälille. Voitelujärjestelmän syöttäessä rasvaa 29 cm³ voitelujaksoa kohden, vuorokaudessa rasvaa kuluu 406 cm³, jos voitelujaksoja on 14. Vuorokausissa mitattuna 1000 tuntia on 42 vuorokautta ja tässä ajassa rasvaa kuluu noin 17 litraa. Näin ollen 18 litran säiliön pitäisi olla riittävä.

Vaihtoehtoisen järjestelmän tarkkaa toimivuutta ja suorituskykyä on mahdollista arvioida vasta, kun tarkemmat suunnitelmat on tehty ja järjestelmää voidaan testata käytännössä edes pienessä mittakaavassa. Myös voitelulinjojen vetäminen koneen läpi tulee miettiä tarkkaan.

Periaatesuunnittelun tuloksena voidaan todeta, että Groeneveldin kaksilinjaisen järjestelmän asentaminen konttilukkiin on mahdollista ja syötetyt rasvamäärät saadaan halutulle tasolle suunnitelmaa noudattamalla. Kaksilinjainen järjestelmä toisi joustavuuden lisäksi muitakin etuja, kuten alemman käyttöpainetason ja Groeneveldin (2017) mukaan mahdollisuuden käyttää biohajoavia rasvoja. Alempi painetaso vähentää mahdollisten tukoksien syntymistä, koska korkeassa paineessa rasvan saennin erottuu perusöljystä helpommin. Satamakäytössä rasvan biohajoavuus olisi suuri etu.

7. ERI VAIHTOEHTOJEN VERTAILU JA ANALYSOINTI

Tässä diplomityössä on esitelty kolme eri voitelujärjestelmää. Konttilukin alkuperäinen Lincolnin progressiivinen järjestelmä ja tästä kehitetty versio, jossa rasvamääriä säädetään pääasiassa pienemmäksi. Näiden lisäksi perehdyttiin täysin erilaiseen vaihtoehtoiseen kaksilinjaiseen voitelujärjestelmään. Kaikista järjestelmistä löytyy hyviä ja huonoja puolia niin voitelun kannalta kuin yleisellä tasolla.

Vertailtaessa Lincolnin alkuperäistä progressiivista järjestelmää ja kehitettyä järjestelmää, voidaan todeta rasvamäärien pudonneen kehitetyssä järjestelmässä merkittävästi kohtuullisen pienillä muutoksilla. Vanhan ja kehitetyn järjestelmän erottavat toisistaan pumppuyksiköiden tuottojen erot ja järjestelmän muuttuminen fyysisesti kahden jakajan vaihtumisella sekä putkituksen vetäminen sivurunkojen ensimmäiseltä jakajalta suoraan ohjausvivulle. Sen sijaan pumpun käynti- ja taukoaika pysyivät alkuperäisinä kuin myös voitelupisteiden, jakajien ja pumppuyksiköiden lukumäärä. Vaikka rasvamääriä vähennettiin runsaasti, kriittisten kohteiden voitelumäärät pysyivät riittävällä tasolla.

Kehitettyä järjestelmää tulee testata käytännössä riittävästi, jotta voitelun toimivuus voidaan varmistaa, eikä voitelukohteilla synny ali- tai ylivoitelutilanteita. Alkuperäisen järjestelmän syöttämät rasvamäärät eivät perustuneet mihinkään tiettyyn voiteluteoriaan, ja voitelujärjestelmän haasteita oli ratkottu muiden töiden ohessa. Tässä diplomityössä kehitetyn järjestelmän rasvamäärät on mitoitettu hyödyntämällä kirjallisuusselvityksessä löydettyjä teorioita sekä ohjeita. Vierintälaakereiden osalta mitoitus tehtiin kaavaa (3) soveltamalla ja liukulaakereiden rasvamäärät mitoitettiin laskemalla laakereiden vapaa tilavuus ja määrittämällä riittävä voitelutiheys. Näin ollen kehitetty järjestelmä kuluttaa vähemmän rasvaa kuin alkuperäinen, ja teoriassa voitelu on riittävällä tasolla määrällisesti ja voiteluaine vaihtuu kriittisissä kohteissa riittävän usein.

Kun nykyistä järjestelmää aletaan modifioida, järkevin ratkaisu ensimmäisessä vaiheessa voisi olla vain toisen sivurungon voitelun muuttaminen. Tällöin olisi mahdollista seurata voitelun toimivuutta uusilla asetuksilla sekä vertailla konkreettisesti rasvamäärien eroja sivurunkojen välillä. Tarttujan rasvamääriä kannattaa muuttaa vasta sitten, kun sivurunkojen voitelu on havaittu toimivaksi.

Verrattaessa Lincolnin kehitettyä progressiivista järjestelmää Groeneveldin kaksilinjaiseen järjestelmään nähdään, että voitelumäärät saatiin samalle tasolle, vaikka järjestelmien toimintaperiaatteet ja säätötavat eroavat toisistaan. Vallitsevat olosuhteet vaikuttavat suuresti voitelun toimivuuteen. Tietyissä olosuhteissa toimivaksi säädetty voitelujär-

jestelmä ei todennäköisesti toimi, jos lämpötila, käytetty voiteluaine tai voitelukohteen käyttötapa muuttuvat. Tämän vuoksi käytössä olevaan voitelujärjestelmään on lähes aina tehtävä pieniä muutoksia käyttöolosuhteiden vaihtuessa.

Säätömahdollisuudet Lincolnin järjestelmässä ovat rajalliset. Voitelulinjaan syötettyä rasvamäärää voidaan säätää muuttamalla pumppuyksikön tuottoa. Tällöin kuitenkin yksittäisen voitelukohteen rasvamäärän muuttaminen on mahdotonta, koska tuoton pienentäminen tai suurentaminen vaikuttaa voitelulinjan kaikkien kohteiden saamiin rasvamääriin. Yksittäisen voitelukohteen saaman rasvamäärän muuttaminen voidaan toteuttaa vaihtamalla jakaja, mutta tällöinkin joku toinen voitelukohde saa liian vähän tai liikaa rasvaa. Tässä työssä toteutettu vanhan järjestelmän kehittäminen vaati sen, että joku kohde saa aikaisempaa enemmän rasvaa, jotta toisilta kohteilta pystyttiin sitä vähentämään. Kalmarin käyttämästä järjestelmästä löytyi voitelukohde, jonka voitelumäärää oli suurennettava.

Groeneveldin kaksilinjaisen järjestelmän säätäminen on tehty voitelupisteittäin helpommaksi. Voitelupisteelle voidaan valita sopivan kokoinen annostelija, joka syöttää kohteelle tietyn määrän rasvaa voitelujaksoa kohden. Voiteluaineen määrää voidaan muuttaa vaihtamalla annostelija erikokoiseen, jolloin koko voitelulinjan rasvamääriin ei tarvitse koskea, kun voitelujaksojen tiheys on valittu sopivaksi. Myös voitelukohteiden lisääminen tai poistaminen onnistuu Groeneveldin järjestelmässä, kun erilaisen jakajan vaihtaminen tai jakajan portin tulppaaminen ei muuta voitelupisteiden saamia rasvamääriä. Lincolnin jakajassa tämä on todellinen ongelma, koska voitelupisteiden lisääntyessä tarvitaan erilainen jakaja ja tällöin rasvamäärää pitää lisätä pumppuyksiköltä käsin. Muutoin kaikki kyseisen jakajan voitelukohteet saavat vähemmän rasvaa kuin aikaisemmin. Näin ollen Groeneveldin järjestelmän syöttämiä rasvamääriä voidaan helpommin säätää käyttöolosuhteiden mukaan.

Molemmissa järjestelmissä pumpun perustoiminta on samanlaista. Sähkömoottori pyörittää kierukkavaihteen avulla epäkeskoa, joka taas käyttää erillisiä pumppuelementtejä. Lincolnissa voitelulinjaa kohden on aina yksi pumppuyksikkö, mutta Groeneveldin Twin-järjestelmässä pumppuyksiköitä on 3 ja XL-versiossa 5 voitelulinjaa kohden. Vaihtoehtoisen järjestelmän toteuttaminen yhdellä pumpulla vähentää voitelun luotettavuutta, kun kaikki voitelulinjat ovat yhden pumpun takana. Lincolnin järjestelmässä yhden pumppuyksikön rikkoutuessa vain sen takana olevat voitelukohteet jäävät ilman rasvaa, mutta muiden linjojen kohteet saavat voitelua normaalisti. Lincolnin järjestelmässä käyttöpainetaso on noin 300 bar, kun se vaihtoehtoisessa järjestelmässä on vain 100 bar. Suurempi paine voitelulinjassa edistää perusöljyn erottumista saentimesta, jolloin linjan tukkeutumisen riski on suurempi.

Lincolnin järjestelmä on kytketty suoraan konttilukin PLC-järjestelmään ja saman voi tehdä Groeneveldin järjestelmän kanssa. Tällöin järjestelmän säätäminen voidaan toteuttaa koneen oman PLC:n kautta ja myös virheilmoitukset saadaan suoraan samaan

paikkaan. Toiminnon tärkeys korostuu erityisesti automaattisissa koneissa, jolloin konetta valvotaan etänä, eikä voitelun toimivuutta voida havaita koko ajan silmämääräisesti.

Sekä Lincolnin että Groeneveldin voitelujärjestelmässä voidaan käyttää voitelurasvoja aina jäykkyysluokkaan NLGI 2 saakka. Erityisesti lämpimät käyttöolosuhteet vaativat jäykän NLGI 2 -rasvan käyttämistä. Kaksilinjaisessa järjestelmässä voidaan käyttää myös biohajoavia rasvoja, mutta niiden käyttäminen Lincolnin progressiivisessa järjestelmässä ei ainakaan tietävästi ole mahdollista. Tulevaisuudessa tietyn tyyppisten voiteluaineiden käyttöä voidaan rajoittaa esimerkiksi vesistöjen läheisyydessä, jolloin biorasvojen käyttömahdollisuus on suuri etu Groeneveldin järjestelmässä.

Groeneveldin kaksilinjainen Twin-järjestelmä XL-pumpulla on noin kolmasosan Lincolnin progressiivista järjestelmää kalliimpi, kun otetaan huomioon tarvittavat komponentit, letkut ja putket. Keskusvoitelujärjestelmä on kuitenkin vain pieni osa konttilukkia ja saatu lisäarvo kalliimmasta voitelujärjestelmästä tulee miettiä tarkkaan. Sijoitus lienee hyvä, jos sillä saa aikaan luotettavamman voitelujärjestelmän, jonka säätäminen on helpompaa ja tarkempaa. Myös biorasvojen käyttömahdollisuus tuo lisäarvoa sekä Kalmarille että asiakkaille.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia, voidaanko konttilukin rasvavoitelujärjestelmää kehittää käyttämällä apuna kirjallisuudesta löydettyjä rasvavoiteluteorioita sekä tutkimalla uusia vaihtoehtoisia järjestelmiä. Tutkimuskysymykseen voidaan vastata myöntävästi. Työssä saatiin kehitettyä nykyistä järjestelmää voiteluteorioiden avulla sekä tehtyä alustava suunnitelma vaihtoehtoiselle voitelujärjestelmälle. Tämä antaa Kalmarille kaksi eri vaihtoehtoa voitelujärjestelmän kehittämisen suhteen. Taulukkoon 17 on koottu Lincolnin ja Groeneveldin järjestelmien vertailu.

Taulukko 17. *Nykyisen ja vaihtoehtoisen voitelujärjestelmän vertailu.*

	Lincoln	Groeneveld
Biorasvojen käyttö	Ei	Kyllä
NLGI-luokka	2	2
Painetaso [bar]	300	100
Suhteellinen hinta (sis. Komponentit, letkut, putket)	1	1,33
Säätötavat	Pumppuyksikön tuotto, tauko aika, jakajien muuttaminen	Voitelujaksojen määrä, annostelijan koko
Säädettävyyttä	Kankea, yksittäisen voitelupisteen muuttaminen vaikeaa	Annostelijaa vaihtamalla hyvä säädettävyyttä voitelupisteittäin
Virheilmoitukset	PLC	PLC

8. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, voidaanko konttilukin rasvavoitelujärjestelmää kehittää käyttämällä apuna kirjallisuudesta löydettyjä rasvavoiteluteorioita sekä tutkimalla uusia vaihtoehtoisia järjestelmiä. Tavoitteena oli saada syötetyt rasvamäärät sopiviksi, ettei ylivoitelua tapahtuisi. Tarve työlle ilmeni, kun asiakaspalautteiden ja Kalmarin omien testien perusteella havaittiin ylivoitelua osassa konttilukeista.

Kirjallisuusselvitystä tehtäessä huomattiin rasvavoitelun tapauksessa voitelumekanismien olevan huomomin tunnettuja kuin öljyjen. Tämä johtuu osittain rasvan jäykkyyden aiheuttamista virtausteknisistä rajoituksista. Tässä työssä esitetyissä lähteissä toistuvina teemoina rasvavoitelun osalta kuitenkin olivat rasvamääriä tärkeämpinä elementteinä vallitsevien olosuhteiden huomioiminen sekä voiteluaineen riittävä vaihtumistiheys voitelukohteessa. Tarkkoja rasvamääriä liuku- ja nivellaakereille ei ole todennäköisesti olemassa, koska yksiselitteisiä arvoja on vaikea yleistää kaikille olosuhteille toimiviksi.

Nykyiseen keskusvoitelujärjestelmään perehdyttiin voitelukohteittain, jotta päästiin selville kohteiden tyypeistä, lukumääristä sekä syötetyistä rasvamääristä. Tässä diplomityön ensimmäisessä osatehtävässä onnistuttiin erittäin hyvin ja nyt keskusvoitelun piirissä olevat voitelukohteet ovat helpommin hahmotettavissa. Toisena osatehtävänä vertailtiin nykyisen järjestelmän voitelumääriä kirjallisuusselvityksessä havaittuihin ohjeisiin sekä teorioihin. Tämän mukaan kaikki paitsi yksi konttilukin voitelukohde saivat liikaa rasvaa, mikä lähtökohtana olikin.

Voitelumäärien pienentämiseksi nykyistä järjestelmää täytyi kehittää. Keinoja ei ollut tarjolla kovin montaa järjestelmän kankeuden vuoksi. Voitelujärjestelmästä tehtyä Excel-mallia hyödyntämällä pystyttiin eri säätöjen vaikutukset havaitsemaan rasvamäärien osalta voitelupisteittäin. Lähtökohdaksi uusille voiteluparametreille otettiin voitelurasvan vaihtuminen kohteissa vähintään viikon välein ja rasvamäärät mitoitettiin laakerin vapaan tilan tai kaavan 3 tuloksen perusteella. Näin ollen varmistuttiin voitelurasvan riittävän tiheästä vaihtumisesta sekä sopivasta voiteluainemäärästä voitelukohteella.

Neljäntenä osatehtävänä työssä tutustuttiin vaihtoehtoiseen voitelujärjestelmään ja tehtiin periaatemitoitus kyseiselle järjestelmälle. Vaihtoehtoiseksi järjestelmäksi valikoitui Groeneveldin kaksilinjainen voitelujärjestelmä sen vuoksi, että Kalmarilla oli jo aikaisemmin ollut kyseisen toimittajan kanssa yhteistyötä ja kaksilinjainen järjestelmä on Kalmarin puolesta varteenotettava vaihtoehto nykyisen progressiivisen järjestelmän korvaajaksi. Periaatemitoituksessa havaittiin, että nykyinen järjestelmä olisi mahdollista

korvata kaksilinjaisella järjestelmällä ja syötettävät voitelumäärät ovat säädettävissä lähemmäs kehitetyn järjestelmän määriä. Ehdotetun järjestelmän toimintaa ei ollut mahdollista todentaa, eikä voitelulinjojen sijoitteluihin otettu kantaa. Jos Kalmar päättää vaihtaa voitelujärjestelmää, täytyy nämä asiat huomioida myöhemmin.

Vertailtaessa järjestelmiä keskityttiin ensin Lincolnin järjestelmään ennen ja jälkeen kehitystyön. Rasvamäärä vähennettiin noin puoleen alkuperäisestä silti säilyttäen riittävä voitelu voitelukohteilla. Käytännössä voitelun toimivuutta ei päästy todentamaan, mutta siihen ryhdyttäessä on seärkevintä toteuttaa osa kerrallaan, eikä muuttaa koko koneen voitelua kerralla. Näin ollen voidaan keskittyä yhteen muutokseen ja saada se toimivaksi ennen seuraavaan kohteeseen siirtymistä.

Kehitettyä Lincolnin järjestelmää verrattiin vaihtoehtoiseen Groeneveldin kaksilinjaiseen järjestelmään. Suurimmat eroavaisuudet järjestelmien välillä ovat käyttöpainetaso, säätötavat sekä hinta. Erityisesti parempi säädettävyys on Groeneveldin järjestelmässä etu, joka Kalmarin sisäisen hyödyn lisäksi toisi lisäarvoa asiakkaalle. Vallitsevien käyttöolosuhteiden vaikutus voitelun toimivuuteen olisi paremmin hallittavissa kaksilinjaisella järjestelmällä, kun voitelukohteen saamaa rasvamäärää voidaan muuttaa annostelijaa vaihtamalla. Myös biorasvojen käyttömahdollisuus turvaisi järjestelmän käytettävyyden tulevaisuudessa.

Mahdollisia jatkotutkimusaiheita voisivat olla kehitetyn järjestelmän voitelun toimivuuden toteaminen sekä perusteellisen suunnittelun toteuttaminen vaihtoehtoiselle järjestelmälle. Myös voitelurasvojen ikääntymisestä satamaolosuhteissa olisi mielenkiintoista nähdä tutkimustuloksia erilaisissa voitelukohteissa. Tämän ansiosta olisi mahdollista säätää rasvan vaihtumistiheyttä sopivammaksi konttilukin voitelukohteiden osalta.

Tässä diplomityössä asetettuun tutkimuskysymykseen vastattiin onnistuneesti. Konttilukin nykyistä voitelujärjestelmää on mahdollista kehittää kirjallisuudesta löydettyjen ohjeiden ja teorioiden avulla tai korvaamalla nykyinen järjestelmä vaihtoehtoisella voitelujärjestelmällä. Nykyisen voitelujärjestelmän kehittäminen on suhteessa yksinkertainen tapa saada voitelun toimivuutta paremmaksi, mutta pitkällä tähtäimellä vaihtoehtoinen järjestelmä on parempi ratkaisu uudeksi voitelujärjestelmäksi säädettävyytensä ansiosta. Voitelu on loppujen lopuksi vain yksi koneen osa-alueista, jonka tulee toimia luotettavasti. Siihen käytettävät panokset tulee arvioida saavutettavan lisäarvon mukaan.

LÄHTEET

Exxon Mobil Corporation. (2012). Grease-Lubricated Plain Bearings and Grease Application System, 2 s. Saatavissa (viitattu 15.2.2017): <https://www.mobil.com/en/industrial/lubricant-expertise/resources/fluid-bearing-fluid-film-lubrication>

FAG Sales Europe – Finland. (1998). Vierintälaakereiden voitelu, Julkaisu no. WL 81 115/4 Fib. Saatavissa (viitattu 28.11.2016): http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/publication/downloads_18/wl_81115_4_fi_fi.pdf

Groeneveld Transport Efficiency B.V. (2013). Automatic Greasing System Twin-3, General Manual, 48 s. Saatavissa (viitattu 17.3.2017): https://www.groeneveld-lubrication-solutions.com/files/4314/8180/6650/Twin-3_General_Manual.pdf

Groeneveld Transport Efficiency B.V. (2014). Automatic TWIN-3 Greasing System, Straddle Carrier, Installation manual, 46 s. Sisäinen dokumentti.

Groeneveld Transport Efficiency B.V. (2015). Twin XL dual-line automatic lubrication system, Specification sheet. Saatavissa (viitattu 5.4.2017): https://www.groeneveld-lubricationsolutions.com/files/6714/8215/9026/technical_specification_twin_xl_barrel_pump_eng.pdf

Groeneveld Transport Efficiency B.V. (2017). Twin XL, Heavy-duty NLGI-2 automatic lubrication system, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.4.2017): <https://www.groeneveld-lubrication-solutions.com/en/products/automatic-lubrication-systems/twin-xl/>

Groeneveld Transport Efficiency B.V. (2017b). Twin, Parallel NLGI-2 heavy duty automatic lubrication system, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.4.2017): <https://www.groeneveld-lubrication-solutions.com/en/products/automatic-lubrication-systems/twin/>

Hynönen, P. (2005). Vierintälaakerien rasvakeskusvoitelu. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Tampere, 101 s.

Jauhiainen, T. (2008). Rasvavoitelu – ongelmia vierintälaakereissa. Promaint, No. 2, s. 40–43.

Kalmar. (2000). Ylälaakeri. Valmistuskuva. Sisäinen dokumentti.

Kalmar. (2002). Laakeripesä. Valmistuskuva. Sisäinen dokumentti.

Kalmar. (2007). Pumppuelementin asennus- ja säätöohjeet. Sisäinen dokumentti.

Kalmar. (2012a). Alalaakeri, ohjausvarsi. Valmistuskuva. Sisäinen dokumentti.

- Kalmar. (2012b). Sylinteri. Kokoonpanokuva. Sisäinen dokumentti.
- Kalmar. (2013). Ohjauslaite. Kokoonpanokuva. Sisäinen dokumentti.
- Kalmar. (2014a). Nostopalkki, osat, etu. Kokoonpanokuva. Sisäinen dokumentti.
- Kalmar. (2014b). Raidetanko. Valmistuskuva. Sisäinen dokumentti.
- Kalmar. (2016a). Tietoa Kalmarista, Kestävä kehitys, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.2.2017): <http://www.kalmar.fi/tietoa-kalmarista/kestava-kehitys/>
- Kalmar. (2016b). Straddle Carrier ESC 350 Maintenance Manual, 563 s.
- Kalmar. (2017). Tietoa Kalmarista, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.4.2017): <https://www.kalmar.fi/tietoa-kalmarista/>
- Kara, W. (1989). Voiteluaineet: Valmistus, ominaisuudet, käyttö. Otakustantamo, Hämeenlinna, 184 s.
- Katz, S. (2012). 5 ways to prevent bearing failures. Machinery Lubrication, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.1.2017): <http://www.machinerylubrication.com/Read/28854/prevent-bearing-failures>
- Kivioja, S., Kivivuori, S., Salonen, P. (2007). Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. Otatieto, Helsinki, 346 s.
- Kunnossapitoyhdistys Promaint ry. (2010). Voitelutekninen toimikunta, Teollisuuden rasvavoitelu, Helsinki, 48 s.
- Kunnossapitoyhdistys Promaint ry. (2013). Voitelutekninen toimikunta, Teollisuusvoitelu, Kerava, 250 s.
- Lincoln GmbH & Co. (1999). Multiline Pump Model P215, Owner Manual, 29 s.
- Lincoln GmbH & Co. (2006). Quickclub, Progressive Metering Devices for Grease and Oil – Model SSV, Operating Instructions, 92 s.
- Mang, T., Dresel, W. (2007). Lubricants and lubrication. Wiley-VCH, Weinheim, 850 s.
- Miettinen, J. (2001). Uusinta tietoa rasvavoitelusta. Kunnossapito, No. 1, s. 20–23.
- Neste Oil. (2013). Voiteluaineiden ja kemikaalien tuoteluettelo, 56 s. Saatavissa (viitattu 13.3.2017): <http://www.motoral.fi/files/documents/21-40/Neste%20oil%20tuoteluettelo%202013.pdf>

Parikka, R., Sainio, H. (2004). Vierintälaakerien rasvavoitelun perusteet, Tutkimusraportti, VTT, Espoo, 31 s. Saatavissa (viitattu 3.12.2016): http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/rasvavoitelu_btuo43_041258.pdf

PSK 5501. (2007). Keskusvoitelujärjestelmät. Hankinta. PSK Standardisointiyhdistys ry, 7 s.

Pöllänen, M. Säily, Kalenoja & Mäntynen. (2005). Merenkulku ja satamatoiminnot, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 171 s.

Scott, R. (2005). Journal bearings and their lubrication, Machinery lubrication, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.2.2017): <http://www.machinerylubrication.com/Read/779/journal-bearing-lubrication>

Shell Malaysia Trading Sdn Bhd. (2015). Safety Data Sheet. Shell Gadus S2 V220 2, 14 s. Saatavissa (viitattu 13.3.2017): www.epc.shell.com/docs/GSAP_msds_01259869.PDF

SKF Maintenance Products. (2009). SKF Grease Test Kit TKG1 1, 47 s. Saatavilla (viitattu 21.3.2017): <http://www.skf.com/binary/31-35956/MP5366E.pdf>

SKF Group. (2015a). Dual-line lubrication systems, Product catalogue, 72 s. Saatavissa (viitattu 9.1.2017): <http://www.skf.com/binary/21-254666/16132EN.pdf>

SKF Lubrication systems Germany GmbH. (2015b). Lincoln Multi-line and progressive systems, 47 s. Saatavissa (viitattu 10.1.2017): <http://www.skf.com/binary/58-142088/W-113-EN.pdf>

SKF Group. (2017). Products, Lubrication solutions, Manual Lubrication tools, Grease meter, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.3.2017): <http://www.skf.com/group/products/lubrication-solutions/manual-lubrication-tools/grease-meter/index.html>

YTM-Industrial Oy. (2016a). Keskusvoitelujärjestelmät (Lincoln), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.1.2017): <http://www.ytm.fi/tuotteet/voitelu/lincolnkeskusvoitelujarjestelmat/>

YTM-Industrial Oy. (2016b). Lincoln P203-V00 voitelujärjestelmän käyttöohje, 15 s. Saatavissa (viitattu 9.1.2017): <http://www.ytm.fi/download/voitelu/Lincoln/k%C3%A4ytt%C3%B6hjeet/Lincoln%20P203-V00%20voiteluj%C3%A4rjestelm%C3%A4n%20k%C3%A4ytt%C3%B6hje.pdf>

LIITE A: PIENENNYSKERTOIMET KAAVALLE 2

34: Epäedullisten käyttö- ja ympäristöolosuhteiden lyhennyskertoimet $f_1 \dots f_6$

Pölyn ja kosteuden vaikutus laakerin toimintapinnoilla

kohtalainen	$f_1 = 0,9 \dots 0,7$
voimakas	$f_1 = 0,7 \dots 0,4$
erittäin voimakas	$f_1 = 0,4 \dots 0,1$

Sysäyskuormituksen, värinän ja värähtelyn vaikutus

kohtalainen	$f_2 = 0,9 \dots 0,7$
voimakas	$f_2 = 0,7 \dots 0,4$
erittäin voimakas	$f_2 = 0,4 \dots 0,1$

Korkeamman laakerilämpötilan vaikutus

kohtalainen (75 °C saakka)	$f_3 = 0,9 \dots 0,6$
voimakas (75 – 85 °C)	$f_3 = 0,6 \dots 0,3$
erittäin voimakas (85 – 120 °C)	$f_3 = 0,3 \dots 0,1$

Korkean kuormituksen vaikutus

$P/C = 0,1 \dots 0,15$	$f_4 = 1,0 \dots 0,7$
$P/C = 0,15 \dots 0,25$	$f_4 = 0,7 \dots 0,4$
$P/C = 0,25 \dots 0,35$	$f_4 = 0,4 \dots 0,1$

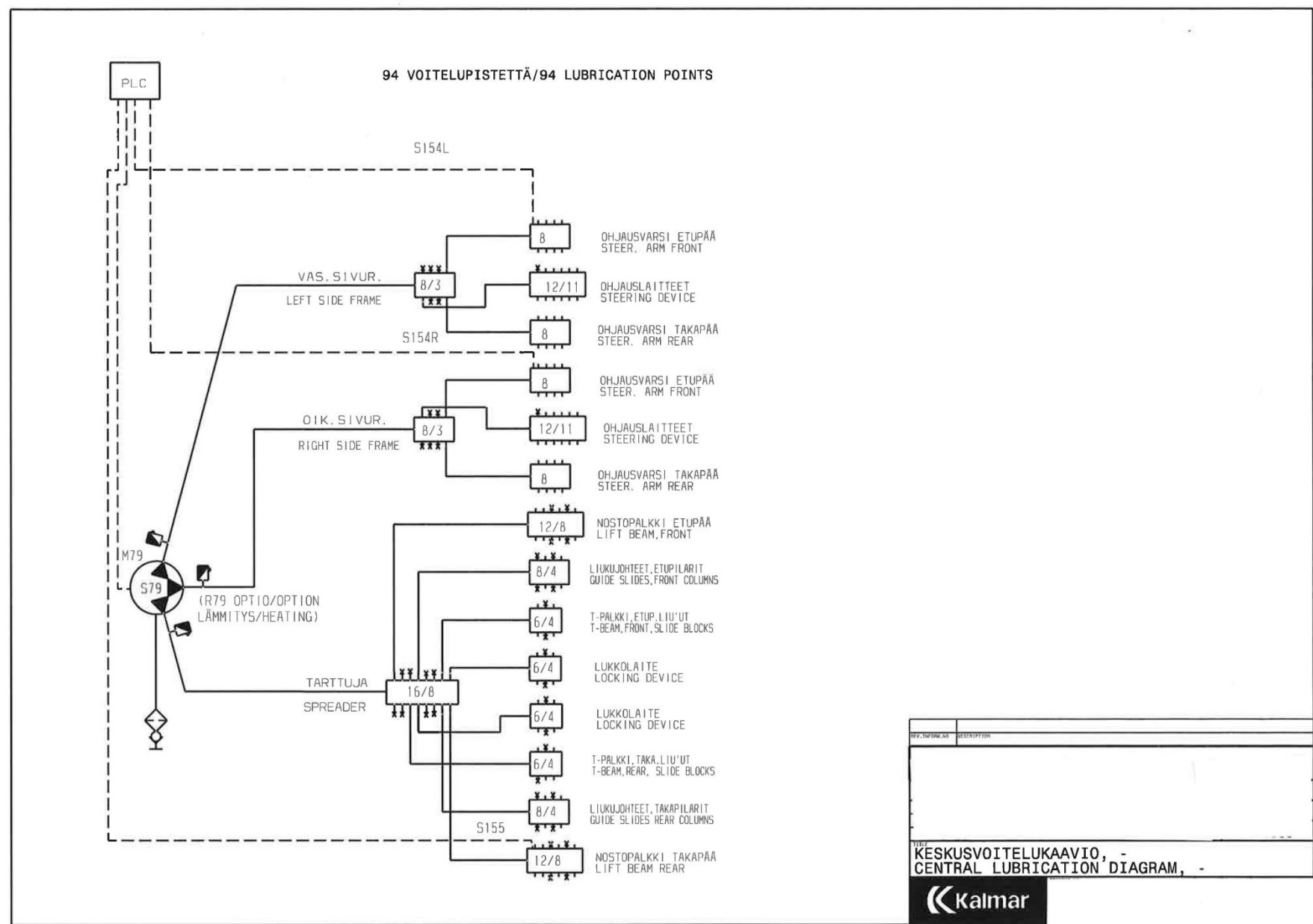
Laakerin läpi menevän ilmavirran vaikutus

vähäinen virtaus	$f_5 = 0,7 \dots 0,5$
voimakas virtaus	$f_5 = 0,5 \dots 0,1$

Keskipakovoiman vaikutus tai pystysuora akseli

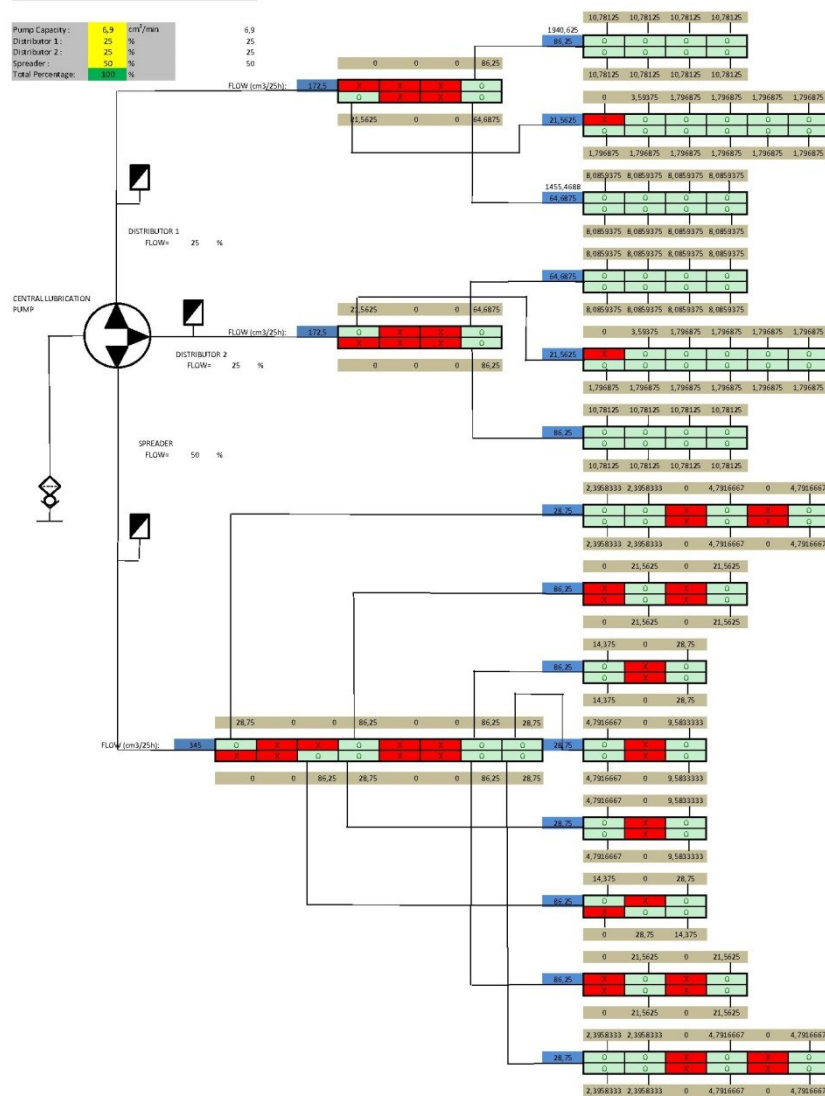
tiivistyksestä riippuen	$f_6 = 0,7 \dots 0,5$
-------------------------	-----------------------

LIITE B: KESKUSVOITELUKAAVIO, NYKYINEN JÄRJESTELMÄ



LIITE C: EXCEL-MALLI, NYKYINEN JÄRJESTELMÄ

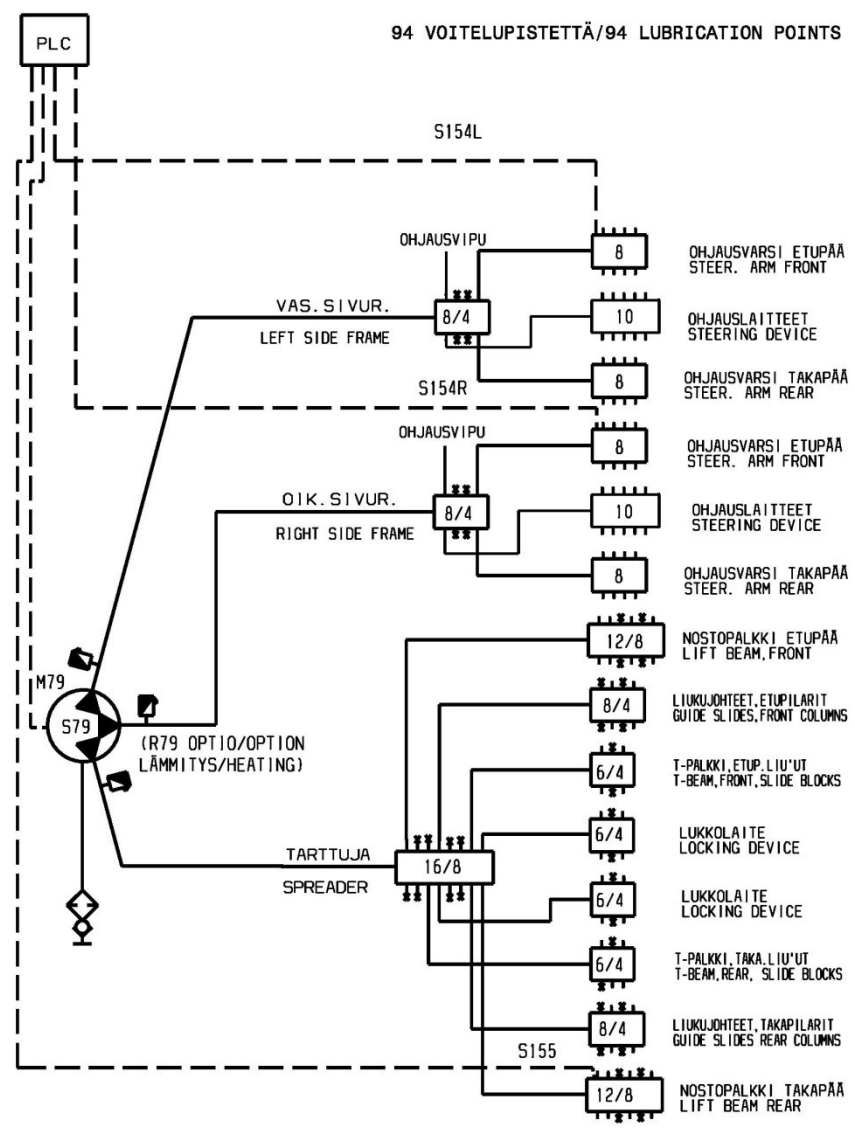
Central Lubrication Circuit Calculations



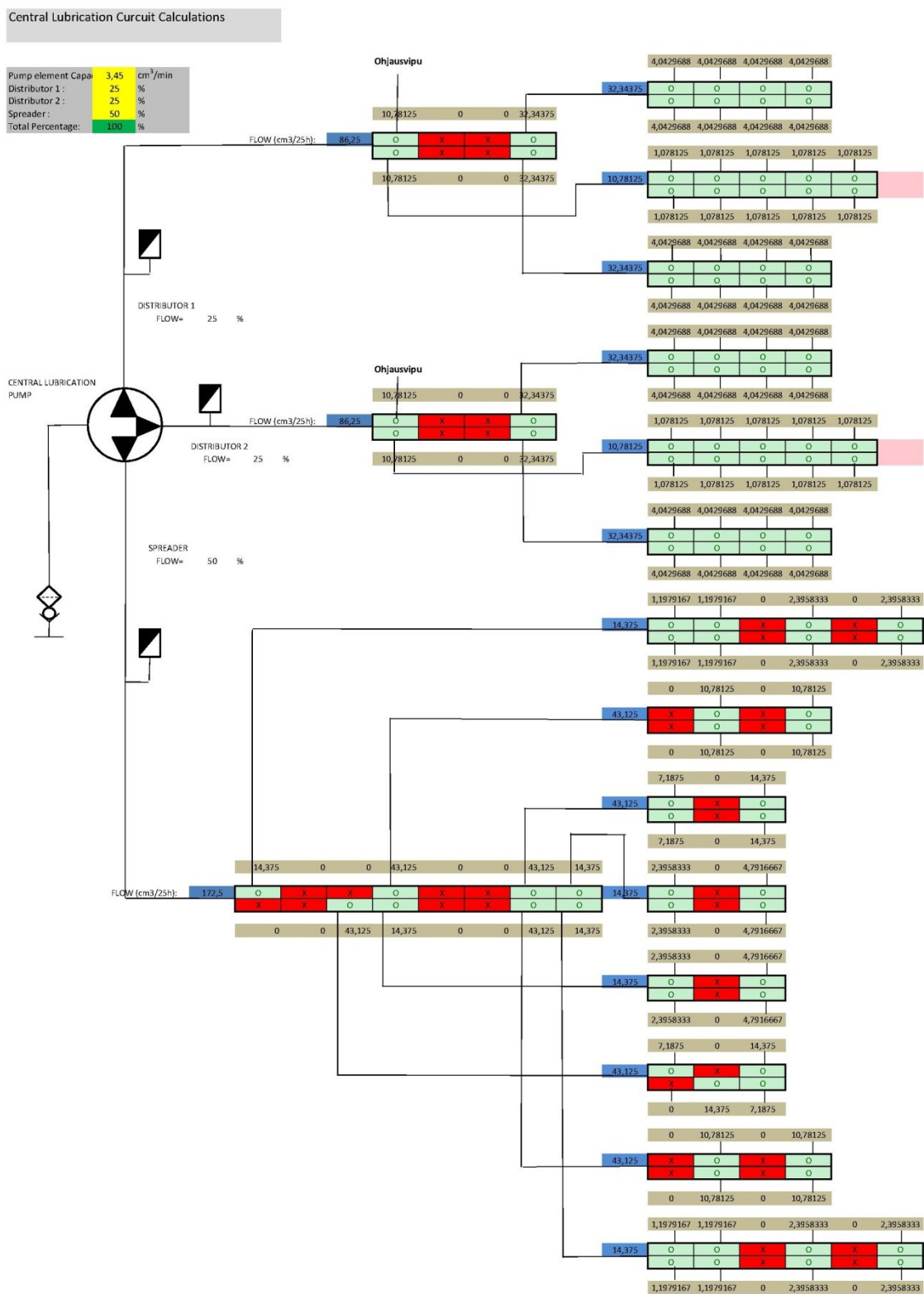
Kierto: vasen talimmainen, oikea etummainen, oikea toinen, oikea kolmas, etc. vasen etummainen, vasen toka etc kunnes tullaan vasen talimmainen ja 2. kierros.

Ohjusvarsi, etappi	1	Nivel 2, ylä	7	Nivel 2, ala
	2	Nivel 1, ylä	8	Nivel 1, ala
	3	Nivel 2, ylä		
	4	Nivel 1, ylä		
	5	Nivel 2, ala		
	6	Nivel 1, ala		
Ohjusdallit	1	Raidertanto 2	7	Raidertanto 1
	2	Raidertanto 3	8	Raidertanto 3
	3	Ohjussuunnit	9	Nivel
	4	Raidertanto 4	10	Raidertanto 2
	5	Raidertanto 1	11	X
	6	Raidertanto 4	12	Ohjussuunnit
Ohjusvarsi, takapää	1	Nivel 2, ylä	7	Nivel 4, ala
	2	Nivel 1, ylä	8	Nivel 3, ala
	3	Nivel 4, ylä		
	4	Nivel 3, ylä		
	5	Nivel 4, ala		
	6	Nivel 3, ala		
Ohjusvarsi, etappi	1	Nivel 1, ylä	7	Nivel 1, ala
	2	Nivel 2, ylä	8	Nivel 2, ala
	3	Nivel 1, ylä		
	4	Nivel 2, ylä		
	5	Nivel 1, ala		
	6	Nivel 2, ala		
Ohjusdallit	1	Raidertanto 2	7	Raidertanto 1
	2	Raidertanto 3	8	Raidertanto 3
	3	Ohjussuunnit	9	Nivel
	4	Raidertanto 4	10	Raidertanto 2
	5	Raidertanto 1	11	X
	6	Raidertanto 4	12	Ohjussuunnit
Ohjusvarsi, takapää	1	Nivel 1, ylä	7	Nivel 3, ala
	2	Nivel 4, ylä	8	Nivel 4, ala
	3	Nivel 3, ylä		
	4	Nivel 4, ylä		
	5	Nivel 3, ala		
	6	Nivel 4, ala		
Nostopikki, etappi	1	Kissa, vasen	7	X
	2	Kissa, oikea	8	X
	3	X	9	Lemikki, vasen
	4	X	10	Lemikki, oikea
	5	X	11	Lemikki, vasen
	6	Kissa, oikea	12	Lemikki, oikea
Luukojenheit, etupää	1	Nostop Luuku, etu, vasen	7	X
	2	Nostop Luuku, etu, oikea	8	X
	3	X		
	4	X		
	5	Nostop Luuku, etu, vasen		
	6	Nostop Luuku, etu, oikea		
T-palkki, etup. Buut	1	T-palkki, etu, ala		
	2	T-palkki, etu, ala		
	3	X		
	4	X		
	5	T-palkki, etu, ylä		
	6	T-palkki, etu, ylä		
Luukolake	1	Luukolake, etu		
	2	Luukolake, etu		
	3	X		
	4	X		
	5	Luukolake, etu		
	6	Luukolake, etu		
Luukolake	1	Luukolake, taka		
	2	Luukolake, taka		
	3	X		
	4	X		
	5	Luukolake, taka		
	6	Luukolake, taka		
T-palkki, takap. Buut	1	T-palkki, taka, ala		
	2	T-palkki, taka, ylä		
	3	X		
	4	T-palkki, taka, ala		
	5	T-palkki, taka, ylä		
	6	X		
Luukojenheit, takapää	1	Nostop Luuku, taka, vasen	7	X
	2	Nostop Luuku, taka, oikea	8	X
	3	X		
	4	X		
	5	Nostop Luuku, taka, vasen		
	6	Nostop Luuku, taka, oikea		
Nostopikki, takapää	1	Kissa, oikea	7	X
	2	Kissa, vasen	8	X
	3	X	9	Lemikki, oikea
	4	X	10	Lemikki, vasen
	5	Kissa, oikea	11	Lemikki, oikea
	6	Kissa, vasen	12	Lemikki, vasen

LIITE D: KESKUSVOITELUKAAVIO, KEHITETTY JÄRJESTELMÄ



LIITE E: EXCEL-MALLI, KEHITETTY JÄRJESTELMÄ



LIITE F: VAIHTOEHTOISEN JÄRJESTELMÄN LASKETUT RASVAMÄÄRÄT

Kohde	Syöttö uusilla asetuksilla (vanha jär- jestelmä) [cm3/24h]	Todellinen syötet- ty rasvamäärä (uusi järjestelmä) [cm3/24h]	Annostimen teoreettinen koko [cm3]	Annostimen todellinen koko [cm3]	Annostimen tyyppinu- mero	Annostimien määrä voitelu- kohteelle	Todellinen syötetty rasvamäärä [cm3/vko]
Lenkki	1,20	1,40	0,09	0,1	2	1	9,80
Lukkolaite	4,79	4,90	0,34	0,35	7	1	34,30
Ohjaussylinteri nivellaakeri	1,08	0,70	0,08	0,05	1	1	4,90
Ohjausvarren liukulaakeri, ala	8,09	8,40	0,58	0,3	6	2	58,80
Ohjausvarren liukulaakeri, ylä	8,09	8,40	0,58	0,3	6	2	58,80
Ohjausvivun vierintälaakerit	10,78	9,80	0,77	0,7	8,5	1	98,00
Pilarin liukujohde	10,78	9,80	0,77	0,7	8,5	1	98,00
Raidetangon pään nivellaakeri	1,08	0,70	0,08	0,05	1	1	4,90
Siirtokelkan laakerointi	2,40	2,80	0,17	0,2	4	1	19,60
T-palkin keskiliukupalat	2,40	2,80	0,17	0,2	4	1	19,60
T-palkin liukupala, alapää	14,38	14,00	1,03	1	9	1	98,00
T-palkin liukupalat, yläpää	7,19	9,80	0,51	0,7	8,5	1	68,60

LIITE G: VAIHTOEHTOISEN JÄRJESTELMÄN VOITELUKAAVIO

